

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍA DE  
MINAS Y ENERGÍA

# TRABAJO FIN DE GRADO

***PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y  
FERTILIZANTES A PARTIR DE RESIDUOS  
VITIVINÍCOLAS MEDIANTE DIGESTIÓN  
ANAEROBIA***

**Alumno:** Martínez Tobía, Emmanuel

**Directora:** Iriondo Hernández, Aitziber

**Curso:** 2019-2020

**Fecha:** Bilbao, 8, Noviembre, 2019



## RESUMEN

---

A lo largo de este proyecto se pretende revalorizar los residuos de vinificación (raspón, orujo y lías) de una bodega de tamaño pequeño situada en la Denominación de Origen Calificada Rioja mediante la digestión anaerobia. Para ello, a partir de las características iniciales de los residuos y su generación discontinua en el tiempo, se establece, en un primer lugar, la mezcla óptima de éstos y, a continuación, los procesos de pretratamiento, en los cuales se fijan las cantidades de aditivos y su modo de agregación, que permiten ajustar los valores de pH, alcalinidad y nutrientes y dan lugar a un sustrato adecuado para los requisitos de la digestión anaerobia.

Posteriormente, se diseñan las especificaciones del digestor anaerobio, que incluyen su dimensionamiento, los parámetros de operación, el modo de agitación y el sistema de calentamiento del sustrato, así como los parámetros y equipos seleccionados para la realización de la monitorización y el control de la digestión anaerobia.

El resultado de un óptimo desarrollo del proceso de digestión permite obtener un combustible gaseoso, denominado biogás, rico en  $\text{CH}_4$  que, una vez purificado a biometano, mediante la eliminación de la humedad y el  $\text{CO}_2$ , permite reducir los costes eléctricos de la bodega hasta un 86%. Además, se obtiene también un subproducto sólido-líquido, llamado digerido, con un gran valor fertilizante, que después de un proceso de digestión aerobia, o compostaje, se destina como aporte de nutrientes y mejora del suelo de los propios viñedos de la bodega.

**Palabras clave:** biomasa, residuos vinícolas, digestión anaerobia, biogás, digerido, fertilizante.

## LABURPENA

---

Proiektu honen bidez Errioxa jatorri-deitura kalifikatuan kokatuta dagoen tamainu ertaineko upeltegi bateko ardogintzan sortutako hondakinen (raspoia, liak eta patsa) balioa handitzea bilatzen da. Horretarako, hondakinen hasierako ezaugarrietatik eta beraien sorketa ez-jaraitutik abiatuta, nahaste optimoa aukeratzen da eta ondorengo aurretratamenduak ezartzen dira. Azken hauetan gehigarrien kantitatea eta gehiketa-era finkatzen dira, hauek pH, alkalinitate ate elikagarri balioen doitzea baimentzen baitute. Horrela digestio-anaerobio baldintzetarako substratu egokia lortzen da.

Ondoren, digestore anaerobioaren espezifikazioak diseinatzen dira, azken hauek barneratzen dituelarik; dimentsionaketa, eragiketa baldintzak, irabiaketa modua eta, digestio anaerobioaren monitorizazioa eta kontrola egiteko parametroen eta ekipamenduaren aukeraketa.

Digestio prozesuaren garapen optimoaren emaitzak erregai gaseoso baten lorpena baimentzen du. Erregai gaseoso honek, biogas deitua,  $\text{CH}_4$ -an aberatsa da, eta biometano lortzeko purifikatua denean, hots hezetasuna eta  $\text{CO}_2$ -a kentzen zaionean, upeltegiaren kostu elektrikoak %86-an murriztea baimentzen du. Gainera, azpiproduktu solido-likidoa lortzen da, digeritua deitua eta ongarrizte-balio altua duena, zeina digestio aerobio, edo konpostaje, baten ondoren, elikagarri-ekarpen bezala eta upeltegiko mahastien lurzorua hobetzeko erabili daitekeen.

**Hitz gakoak:** biomasa, ardogintza hondakinak, digestio anaerobioa, biogas, digeritua, ongarria.

## ABSTRACT

---

Throughout the current project it has been tried to push up the value of the winery waste of fermentation (stalk, pomace and lees) in a familiar small cellar located within the Designation Qualified Origin Rioja through anaerobic digestion. For that, starting at the initial characteristics of the residues and their discontinuous generation over time, it's established firstly the optimal mixture of these ones and next the processes of pretreatment, in which the amount of additives and their way of aggregation are fixed, that let adjust the pH, alkalinity and nutrients values and give rise to an appropriate substrate for the requirements of the anaerobic digestion.

Subsequently, the specifications of the anaerobic digester which include their sizing, the operation parameters, the way of stirring and the system of substrate heating are planned, as far as the parameters and the equipments selected for the carrying the monitoring out and the control of the anaerobic digestion.

The result of an optimal development of the digestion process let obtain a gaseous combustible, named biogas, rich in CH<sub>4</sub>, which once being purified to biomethane by means of humidity and CO<sub>2</sub> removal, allowed to reduce the electric expenses in the cellar up to 86 %. Besides, it has been able to get a solid-liquid subproduct, named digestate, with a high fertilizing value that after a process of aerobic digestion, or composting, it is allocated as a contribution of nutrients and improvement of the soil of the vineyards of the wine cellar themselves.

**Keywords:** biomass, winery waste, anaerobic digestion, biogas, digestate, fertilizer.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. LA ENERGÍA.....</b>	<b>1</b>
1.1.1. HISTORIA DE LA ENERGÍA.....	2
1.1.2. PERSPECTIVA ACTUAL Y FUTURA DE LA ENERGÍA .....	3
1.1.3. DIRECTIVAS EUROPEAS SOBRE RESIDUOS, ENERGÍA Y COMBUSTIBLES.....	5
1.1.4. ENERGÍA Y COMBUSTIBLES A PARTIR DE RESIDUOS .....	6
1.1.4.1. Procesos termoquímicos.....	6
1.1.4.2. Procesos físico-químicos.....	8
1.1.4.3. Procesos bioquímicos.....	9
<b>1.2. EL SECTOR VINÍCOLA .....</b>	<b>10</b>
1.2.1. SITUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL Y NACIONAL DE VINO.....	10
1.2.2. DENOMINACIÓN DE ORIGEN CALIFICADA RIOJA .....	12
1.2.3. LA INDUSTRIA VINÍCOLA .....	14
1.2.3.1. El proceso de vinificación .....	14
1.2.3.2. Residuos generados.....	18
1.2.3.3. Consumo energético en una bodega.....	22
<b>2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO .....</b>	<b>25</b>
<b>3. LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1. DESCRIPCIÓN Y FUNDAMENTOS .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2. ETAPAS DEL PROCESO .....</b>	<b>26</b>
3.2.1. HIDRÓLISIS .....	27
3.2.2. ACIDOGÉNESIS.....	28
3.2.3. ACETOGÉNESIS.....	28
3.2.4. METANOGÉNESIS .....	29
<b>3.3. PARÁMETROS AMBIENTALES Y OPERACIONALES .....</b>	<b>29</b>
3.3.1. TEMPERATURA .....	30
3.3.2. pH.....	31
3.3.3. ALCALINIDAD .....	32
3.3.4. POTENCIAL REDOX.....	33
3.3.5. MACRONUTRIENTES. RELACIONES CARBONO, NITRÓGENO Y FÓSFORO: C/N y N/P..	34
3.3.6. MICRONUTRIENTES.....	35
3.3.7. AGITACIÓN.....	36
3.3.7.1. Agitación mecánica .....	37
3.3.7.2. Agitación neumática.....	41
3.3.7.3. Agitación hidráulica.....	42
<b>4. TIPOS DE DIGESTORES .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1. DIGESTOR ANAEROBIO DISCONTINUO .....</b>	<b>45</b>

<b>4.2. DIGESTORES ANAEROBIOS CONTINUOS Y SEMICONTINUOS .....</b>	<b>47</b>
4.2.1. RURALES .....	47
4.2.1.1. Cúpula o gasómetro fijo (Tipo chino) .....	47
4.2.1.2. Cúpula o gasómetro flotante (Tipo hindú) .....	48
4.2.2. INDUSTRIALES.....	49
4.2.2.1. Mezcla completa.....	49
4.2.2.2. Flujo pistón .....	50
4.2.3. INDUSTRIALES CON RETENCIÓN BACTERIANA.....	51
4.2.3.1. Lecho fijo y Filtro anaerobio.....	51
4.2.3.2. Lecho expandido y Lecho fluidizado .....	53
4.2.3.3. Lecho de lodos (UASB).....	54
<b>5. PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....</b>	<b>55</b>
<b>5.1. BIOGÁS .....</b>	<b>55</b>
5.1.1. CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS.....	55
5.1.2. COMPUESTOS PROBLEMÁTICOS EN EL BIOGÁS .....	57
Tabla 16. Tratamientos habituales para la remoción de CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S y H <sub>2</sub> O en el biogás (continuación) [102, 109, 110]. .....	59
5.1.3. USOS DEL BIOGÁS.....	60
5.1.3.1. Producción de calor .....	60
5.1.3.2. Producción de electricidad y cogeneración .....	60
5.1.3.3. Inyección a la red de gas natural .....	61
5.1.3.4. Combustible para vehículos .....	63
5.1.3.5. Pilas de combustible.....	64
5.1.3.6. Síntesis de derivados químicos .....	65
<b>5.2. DIGERIDO .....</b>	<b>67</b>
5.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL DIGERIDO .....	68
5.2.2. ALMACENAMIENTO .....	70
5.2.3. GESTIÓN DEL DIGERIDO.....	71
5.2.3.1. Aplicación directa .....	71
5.2.3.2. Separación de fases.....	72
5.2.3.3. Gestión de la fracción sólida del digerido .....	73
5.2.3.4. Gestión de la fracción líquida del digerido .....	75
<b>6. METODOLOGÍA DEL TRABAJO .....</b>	<b>79</b>
<b>6.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO INICIAL .....</b>	<b>80</b>
6.1.1. RESIDUOS DE PARTIDA.....	80
6.1.2. ALMACENAMIENTO DE LOS RESIDUOS .....	82
6.1.3. ANÁLISIS PORCENTUAL DE MEZCLAS.....	84
6.1.4. CANTIDAD DE SUSTRATO DE ALIMENTACIÓN.....	87
<b>6.2. PRETRATAMIENTOS.....</b>	<b>89</b>
6.2.1. TRITURACIÓN DEL RASPÓN .....	90
6.2.2. INTRODUCCIÓN DE LA MEZCLA EN EL DIGESTOR.....	90
6.2.3. INOCULADO .....	92
6.2.4. AJUSTE DEL pH .....	95
6.2.5. AJUSTE DE LA ALCALINIDAD .....	96

6.2.6.	ADICIÓN DE FÓSFORO .....	98
6.2.7.	MEZCLADO.....	99
<b>6.3.</b>	<b>SELECCIÓN Y DISEÑO DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIO .....</b>	<b>100</b>
6.3.1.	TIPO DE DIGESTOR.....	100
6.3.2.	PARÁMETROS DE OPERACIÓN .....	101
6.3.2.1.	Temperatura .....	101
6.3.2.2.	pH .....	102
6.3.2.3.	Alcalinidad.....	102
6.3.2.4.	Tiempo de arranque y de digestión .....	102
6.3.2.5.	Agitación .....	102
6.3.3.	SISTEMA DE CALEFACCIÓN.....	103
6.3.4.	CONTROL DE pH, TEMPERATURA Y ALCALINIDAD .....	111
6.3.5.	AGITADOR .....	113
6.3.6.	SALIDA DE BIOGÁS .....	114
<b>6.4.</b>	<b>GESTIÓN DEL BIOGÁS.....</b>	<b>114</b>
6.4.1.	PRODUCCIÓN ANUAL .....	114
6.4.2.	PURIFICACIÓN.....	116
6.4.2.1.	Eliminación del H <sub>2</sub> O.....	116
6.4.2.2.	Eliminación del CO <sub>2</sub> .....	118
6.4.3.	CONSUMO .....	119
6.4.4.	ALMACENAMIENTO .....	122
<b>6.5.</b>	<b>GESTIÓN DEL DIGERIDO .....</b>	<b>123</b>
6.5.1.	Almacenamiento y separación sólido-líquido.....	124
6.5.2.	Compostaje.....	124
6.5.3.	Gestión del lixiviado .....	124
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>125</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>127</b>



## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1. Tipo de consumo energético en vehículos y máquinas.....	22
Tabla 2. Consumo eléctrico promedio según tipología de la bodega.....	23
Tabla 3. Relación de la temperatura y el tiempo de digestión.....	30
Tabla 4. Influencia del pH en el porcentaje de CH <sub>4</sub> en el biogás.....	31
Tabla 5. Compuestos reductores más utilizados.....	34
Tabla 6. Concentraciones estimulantes e inhibitorias para algunos metales alcalinos y alcalinotérreos. ....	36
Tabla 7. Concentraciones inhibitorias para algunos metales pesados.....	36
Tabla 8. Características y ventajas e inconvenientes de agitadores horizontales...	38
Tabla 9. Características y ventajas e inconvenientes de agitadores de eje largo. ....	40
Tabla 10. Características y ventajas e inconvenientes de agitadores de paletas. ....	41
Tabla 11. Características y ventajas e inconvenientes de la agitación neumática..	42
Tabla 12. Características y ventajas e inconvenientes de las bombas centrífugas, lobulares rotatorias y de tornillo de rotor único excéntrico.....	44
Tabla 13. Composición del biogás después de la digestión anaerobia, en porcentaje en volumen. ....	55
Tabla 14. Entalpías de formación del CH <sub>4(g)</sub> , O <sub>2(g)</sub> , CO <sub>2(g)</sub> y H <sub>2O(l)</sub> en condiciones estándar (25°C y 1 atm). ....	56
Tabla 15. Consecuencias de la presencia de compuestos en el biogás.....	58
Tabla 16. Tratamientos habituales del biogás para la remoción de compuestos. ....	58
Tabla 17. Necesidad de remoción de compuestos problemáticos del biogás.....	60
Tabla 18. Concentraciones admisibles de compuestos problemáticos en el biogás para su uso en motores y microturbinas. ....	61
Tabla 19. Especificaciones para cualquier gas introducido en las redes de gas natural de algunos países europeos. ....	62
Tabla 20. Ventajas e inconvenientes del uso como combustible vehicular de GNC/BMC y GNL/BML. ....	63
Tabla 21. Características de algunos digeridos encontrados en la bibliografía.....	68
Tabla 22. Concentraciones máximas de metales pesados, en mg/kg de materia seca, y de impurezas, en fertilizantes en las diferentes categorías según normativa europea y española.....	69
Tabla 23. Características fisicoquímicas de las fracciones líquida y sólida del digerido encontradas en la bibliografía.....	72
Tabla 24. Composición fisicoquímica y análisis elemental de los residuos de vinificación utilizados. ....	80
Tabla 25. Proporciones y relación C/N del sustrato de alimentación según las diferentes proporciones de la mezcla de residuos.....	84
Tabla 26. Composición fisicoquímica y análisis elemental para las mezclas de alimentación. ....	86
Tabla 27. Costes aproximados de obra civil e instalaciones.....	88

Tabla 28. Características de inóculos en base húmeda y valores seleccionados para el inóculo a utilizar. ....	93
Tabla 29. Propiedades fisicoquímicas y análisis elemental del sustrato M3 y M3i. ....	94
Tabla 30. Composición fisicoquímica y análisis elemental del sustrato de alimentación inoculado y pretratado (M3ip).....	99
Tabla 31. Temperaturas medias, en °C, en la ciudad de Haro para los meses de octubre, noviembre y diciembre durante el período 2009-2018, recogidos por la Estación meteorológica de Haro. ....	104
Tabla 32. Valores del radio, altura y área de la base, muro y cubierta del digestor anaerobio. ....	106
Tabla 33. Valores de espesor, coeficiente de convección, conductividad térmica, coeficiente global de transmisión de calor y tasa de pérdida de calor de la base, muro y cubierta del digestor anaerobio. ....	106
Tabla 34. Propiedades del agua a 65 °C: viscosidad cinemática, densidad, calor específico y conductividad térmica y número de Prandtl. ....	109
Tabla 35. Densidad de CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O y biogás y humedad de saturación del aire a 35 °C.....	117
Tabla 36. Consumo mensual de electricidad en la bodega, instalaciones de postratamiento y total . ....	119
Tabla 37. Especificaciones equipo de microgeneración Senergie G 6.12 TI .....	121
Tabla 38. Datos de consumo eléctrico total, en kWh, y de consumo y producción de biometano, en m <sup>3</sup> y kWh.....	121
Tabla 39. Diferencia entre el consumo y la producción de biometano y su acumulación.....	122
Tabla 40. Presiones y volúmenes del depósito y del biometano.....	122

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1. Cadena tecnológica de la energía: desde mina de carbón hasta el hogar....	1
Figura 2. Demanda de fuentes de energía en el año 2017 y perspectiva en el año 2040. ....	4
Figura 3. Esquema de una planta de incineración.....	6
Figura 4. Esquema de una planta de pirólisis.....	7
Figura 5. Esquema del proceso de gasificación para la generación de electricidad o calor. ....	8
Figura 6. Esquema básico de los procesos para la obtención de biodiésel. ....	9
Figura 7. Esquema de los procesos para la obtención de biogás y fertilizantes. ....	10
Figura 8. Producción mundial de vino para los años comprendidos entre 2000 y 2018. ....	11
Figura 9. Producción de vino en España para los años comprendidos entre 2001 y 2018. ....	12
Figura 10. Mapa de la Denominación de Origen Calificada Rioja.....	12
Figura 11. Esquema básico del proceso de vinificación en tinto mediante maceración carbónica. ....	15
Figura 12. Fase de maceración carbónica. El mosto fermenta en contacto con el raspón, el hollejo y el CO <sub>2</sub> liberado previamente.....	16
Figura 13. Esquema básico del proceso de vinificación en tinto mediante despalillado y estrujado. ....	16
Figura 14. Despalilladora/estrujadora en funcionamiento. A la derecha se recoge el raspón y a la izquierda la uva estrujada.....	17
Figura 15. Esquema básico del proceso de elaboración del vino blanco y rosado..	18
Figura 16. Uva tirada en uno de los renques en una viña de La Rioja.....	19
Figura 17. Diagrama de Sankey del consumo energético de una bodega de tamaño medio.....	24
Figura 18. Fases y productos de la digestión anaerobia: hidrólisis (en amarillo), acidogénesis (en rojo), acetogénesis (en verde) y metanogénesis (en morado). ....	27
Figura 19. Proceso de hidrólisis de un disacárido para producir monosacáridos. .	28
Figura 20. Influencia del pH en la producción de biogás. ....	32
Figura 21. Influencia del pH, alcalinidad y CO <sub>2</sub> en la digestión anaerobia.....	33
Figura 22. Tipos de agitación.....	37
Figura 23. Agitadores horizontales. Propulsor (izq.) y rotor (dcha.).....	39
Figura 24. Agitadores de eje largo. Propulsor inclinado (izq. arriba), rotor inclinado (izq. abajo) y rotor vertical (dcha.).....	39
Figura 25. Agitadores de paletas. Inclinado (izq. arriba), vertical (dcha. arriba) y horizontal (abajo). ....	40
Figura 26. Bomba centrífuga.....	43
Figura 27. Bomba lobular rotatoria de 2 lóbulos (izq.), de 3 lóbulos (centro) y de 4 lóbulos (dcha.).....	43

Figura 28. Bomba de tornillo de rotor único excéntrico.....	44
Figura 29. Clasificación de las tecnologías de digestión anaerobia.....	45
Figura 30. Fases operacionales en un digestor discontinuo.....	46
Figura 31. Digestor discontinuo.....	47
Figura 32. Digestor de cúpula fija o tipo chino.....	48
Figura 33. Digestor de cúpula flotante o tipo hindú.....	49
Figura 34. Digestores de Mezcla Completa y Mezcla Completa con Recirculación. ....	50
Figura 35. Digestor de flujo pistón.....	51
Figura 36. Digestor de lecho fijo y de filtro anaerobio.....	52
Figura 37. Digestor de lecho expandido/fluidizado.....	53
Figura 38. Digestor de lecho de lodos (U.A.S.B.).....	54
Figura 39. Derivados químicos del metanol.....	66
Figura 40. Derivados químicos del amoníaco.....	67
Figura 41. Diagrama de flujo del proceso de obtención de compost a partir del digerido.....	73
Figura 42. Diagrama de flujo de recuperación de nutrientes mediante Stripping. ....	76
Figura 43. Reactor de precipitación mediante adición de óxido de magnesio para la recuperación de nutrientes. ....	77
Figura 44. Diagrama del proceso de Nitrificación-Desnitrificación.....	78
Figura 45. Diagrama de flujo de los procesos para la revalorización de los residuos de vinificación. ....	79
Figura 46. Porcentaje en peso de los subproductos generados en el proceso de vinificación respecto de la cantidad de uva introducida en bodega.....	82
Figura 47. Pozo de almacenamiento de orujos y raspón.....	83
Figura 48. Depósitos de fermentación en Bodegas Muga que se utilizarán después de su retirada para el almacenamiento de lías. ....	83
Figura 49. Trituradora de raspón CME TR50.....	90
Figura 50. Aspiradora de raspón ASP 501/P.....	91
Figura 51. Bomba lobular rotativa Enoveneta PL35 utilizada para bombear los orujos y las lías. ....	91
Figura 52. Equipo para la monitorización del pH y la temperatura. ....	111
Figura 53. Equipo de toma de muestras.....	112
Figura 54. Bomba dosificadora Milton Roy LMI-C-DSD.....	112
Figura 55. Agitador de paletas de la marca Armatec-FTS.....	113
Figura 56. Caudalímetro Krohne Optisonic 7300 Biogás para la medición del caudal de biogás.....	114
Figura 57. Ejemplo de instalación de eliminación de CO <sub>2</sub> mediante tecnología de la empresa Bright Biomethane.....	118
Figura 58. Compresor de pistón Josef Mehrer GmbH & Co KG, modelo TEL 30/S3- 15-F utilizado para la compresión de biometano.....	123

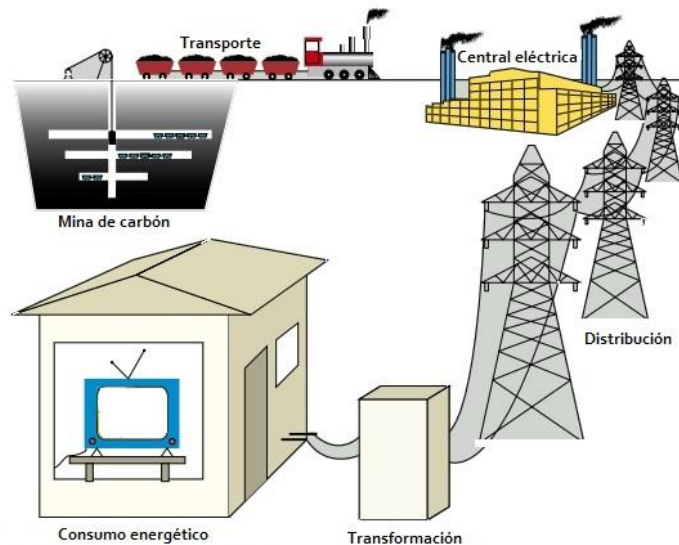
## 1. INTRODUCCIÓN

Basta un viaje de Logroño a Haro para darse cuenta de la importancia del sector vitivinícola en La Rioja. El prestigio nacional e internacional de los vinos producidos dentro de la Denominación de Origen Calificada Rioja lleva décadas atrayendo inversiones cada vez más importantes. Una clara muestra son las bodegas de nueva construcción que no sólo sirven como un elemento necesario para el proceso de elaboración de los caldos, sino que también se erigen como un reclamo dentro del auge del turismo enológico o enoturismo. Y como no, al igual que para cualquier sector industrial, la energía es un aspecto clave.

### 1.1. LA ENERGÍA

La energía es el motor de mundo. Está presente en las denominadas fuentes de energía como pueden ser la madera, el viento, el agua, la comida, el carbón, el petróleo, etc., y adopta muchas formas: mecánica, química, eléctrica, cinética, calorífica, electromagnética, etc. Estas formas de energía son aprovechadas directamente o transformadas en otras que supongan una utilidad mayor.

Hay una larga cadena tecnológica que empieza por la obtención de la energía en su forma primaria: petróleo, radiación solar, viento o carbón. A partir de ahí, la energía es transformada a formas más útiles para el usuario final como energía eléctrica o combustible, como la gasolina. Como ejemplo, en la Figura 1, la energía química almacenada en el carbón es transformada en energía eléctrica en una central térmica [1].



**Figura 1.** Cadena tecnológica de la energía: desde la mina de carbón hasta el hogar [1].

La energía suministrada al usuario se utilizará para iluminar bombillas, encender el televisor, cocinar, o para hacer funcionar el coche o la calefacción. Casi todas las actividades que realiza la sociedad moderna, en su día a día, requieren de electricidad y/o combustible para la obtención de energía térmica.

### **1.1.1. HISTORIA DE LA ENERGÍA**

El ser humano aprendió a controlar el fuego hace más de 500.000 años. Las necesidades energéticas del ser humano en aquellos tiempos eran modestas, sin embargo, jugaban un papel importante. Si el Sol no calentaba lo suficiente debían hacerlo a través del fuego y, por lo tanto, necesitaban de un combustible, en aquel entonces madera [1]. Cuando aprendieron los beneficios de cocinar la carne, las necesidades de energía aumentaron. El cambio de una vida nómada a una más sedentaria trajo la agricultura y el aprovechamiento de la energía de Sol para cultivar. El trabajo de los animales o la velocidad del viento han sido utilizados para hacer la guerra. La velocidad del agua para mover molinos. Y así se podrían enumerar una infinidad de usos de la energía.

A lo largo de la Historia, el consumo energético ha aumentado de una forma más o menos continua hasta el siglo XVII cuando se descubrió la utilidad del carbón como fuente de energía y su comercialización en un negocio muy lucrativo [1]. A partir de entonces, las necesidades se han incrementado exponencialmente debido a ciertos avances tecnológicos clave dados en el siglo XVIII, como, por ejemplo: la producción de acero a partir de carbón mineral, la invención de la batería, pero, sobre todo, la máquina de vapor que provocó, durante ese siglo y el siguiente, una revolución en todas las industrias y cambió la forma en que, tanto mercancías como personas, eran transportadas.

Durante el siglo XIX las necesidades siguieron en claro ascenso con el descubrimiento del gas de alumbrado (proveniente del calentamiento del carbón) que permitió la iluminación de las calles en las ciudades, la proliferación de presas y centrales hidroeléctricas y la experimentación con molinos de viento para generar energía eléctrica [1]. El descubrimiento como fuente de energía del petróleo en 1859 y, posteriormente, la invención de los motores de combustión interna (MCI) [1] permitió el transporte a nivel doméstico y provocó un nuevo salto en las necesidades de energía.

En el siglo XX el consumo energético se disparó. Las guerras mundiales, internacionales y civiles, la aparición del transporte aéreo o la producción en cadena, entre otras causas, aumentaron este consumo. La incursión de la energía nuclear en el panorama energético abarataba aún más el precio de la electricidad y ahorrar no era importante.

### 1.1.2. PERSPECTIVA ACTUAL Y FUTURA DE LA ENERGÍA

A lo largo de los últimos 150 años la sociedad ha aprendido a usar la energía de una manera útil y provechosa [1]. La vida ha cambiado de tal manera que dejar de disponer de ella actualmente sería catastrófico. Sin embargo, el uso racional de la energía y las consecuencias de no hacerlo no han sido consideradas hasta hace bien poco.

Temas tan recurrentes hoy en día como las energías renovables, la contaminación o el calentamiento global, debido a la emisión de gases de efecto invernadero, se empezaron a tener realmente en cuenta cuando la problemática del uso de los combustibles fósiles se hizo más evidente. Los principales inconvenientes son:

- Agotamiento de los yacimientos.
- Contaminación medioambiental (emisiones que contribuyen al efecto invernadero, la destrucción de la capa de ozono, la lluvia ácida y los problemas respiratorios, entre otros).
- Fluctuación de los precios, asociado en muchas de las ocasiones, a conflictos bélicos motivados por el control de los yacimientos.
- Centralización de los recursos y, por ende, dependencia energética de los países no productores.

Otros temas en boga en las sociedades más avanzadas, y especialmente, las dependientes energéticamente de otras, son el consumo moderado, o ahorro y la eficiencia. La razón del auge de estos términos no es otro que el económico, y tanto los combustibles como la energía eléctrica están experimentando subidas del precio continuamente. Por este motivo, los países no productores de petróleo están fomentando políticas de ahorro y eficiencia: si se consume menos, se gasta menos.

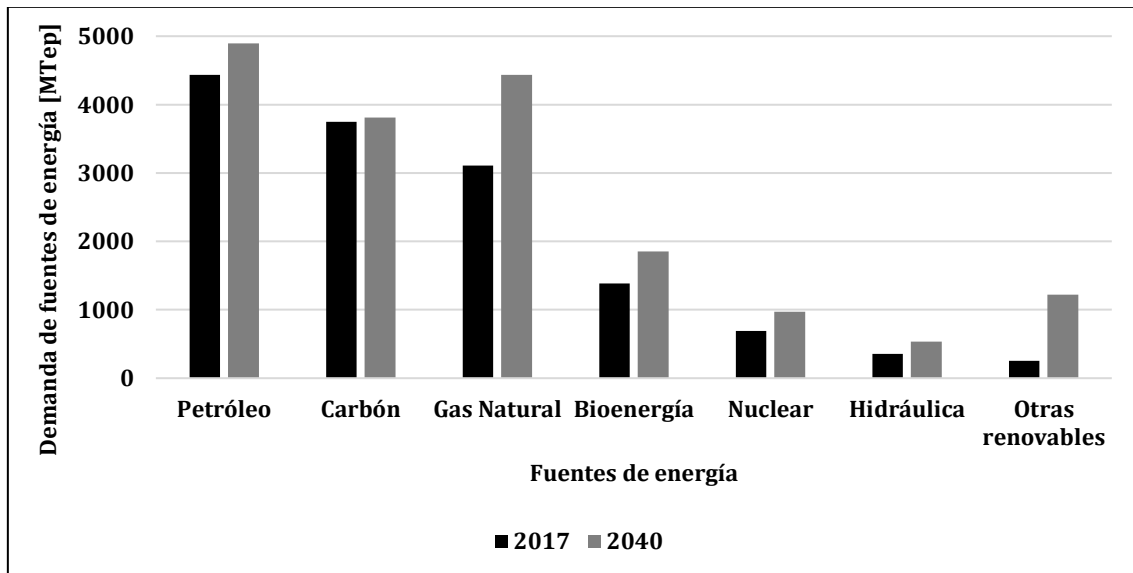
Una parte del incremento constante del precio del petróleo puede ser debido a que, según la Agencia Internacional de la Energía, en su revisión anual de la energía del año 2010 (World Energy Outlook 2010) [2], en 2006 se alcanzara el máximo de extracción de petróleo convencional, el más rentable. Según la teoría de Hubbert [3], a partir de ese momento, llamado Peak oil en inglés, la producción de petróleo convencional empezaría a caer provocando una disminución de la oferta y, por consiguiente, un aumento del precio. Esta teoría ya ha sido confirmada, considerando que la mayor parte de las nuevas explotaciones petrolíferas se realizan por métodos no convencionales, los cuales son menos rentables.

La otra causa del incremento de precio del petróleo es consecuencia de los conflictos políticos en los que pueden encontrarse los países productores y que hacen fluctuar los precios o incluso interrumpir su distribución como, por ejemplo, la crisis de 1973



cuando los países árabes suspendieron el suministro de petróleo a occidente o, más actualmente, en el año 2019, la crisis política y humanitaria en Venezuela.

A pesar de un pensamiento internacional cada vez más orientado hacia una sociedad más sostenible (o, al menos, en los países desarrollados) las necesidades energéticas siguen creciendo. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA en sus siglas en inglés) el consumo energético en el año 2040 será un 30% mayor que el actual (véase Figura 2), lo que equivale a duplicar el consumo de India y China. Sin embargo, el escenario energético será distinto al vivido durante los últimos 25 años debido a tres razones: el liderazgo del gas natural como combustible fósil más demandado (junto con el petróleo, que se mantendría estable), gracias a su bajo contenido de impurezas, el rápido crecimiento de las fuentes de energía renovables y la eficiencia [4].



**Figura 2.** Demanda de fuentes de energía en el año 2017 y perspectiva en el año 2040 [5].

A nivel europeo, en general, con un déficit en la relación entre la producción y el consumo de recursos/combustibles fósiles, la tendencia se dirige hacia fuentes renovables para la producción de energía eléctrica, con el objetivo de reducir la dependencia con los países productores de petróleo y gas natural, en su mayoría árabes, y más aun teniendo en cuenta los conflictos políticos y religiosos de estos estados, tanto entre ellos como con los países occidentales, que podrían provocar discontinuidades en el abastecimiento.

Además de los esfuerzos por obtener una energía más limpia y un uso más razonable y eficiente se deben considerar medidas adicionales que contribuyan a mejorar el panorama energético. Una de ellas es el uso de biomasa como fuente de energía. Las



principales ventajas de su uso en sustitución de los combustibles fósiles radican en el plano medioambiental, aunque no todas [6]:

- Ciclo neutro del CO<sub>2</sub>. El dióxido de carbono liberado en su combustión ha sido captado por la propia biomasa durante su vida.
- Bajas emisiones de contaminantes como azufre, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.
- Producción de otros combustibles de mayor interés energético.
- Descentralización de la producción. Su precio no depende de otros países.
- Mejora socioeconómica de áreas rurales.

Se puede discernir favorablemente que la biomasa constituye un buen acicate para un futuro sostenible considerando las ventajas anteriormente citadas. Además, la biomasa supone una gran alternativa al petróleo y al gas natural como materia prima para la síntesis de productos químicos, los cuales actualmente se obtienen, principalmente, de la industria petroquímica.

Más aún, considerando la biomasa residual generada por la sociedad, tanto a nivel doméstico como industrial, como un recurso para la obtención de energía, y combustibles y/o productos químicos, permitiría también la reducción de los residuos y, por consiguiente, disminuir la problemática de su gestión.

### **1.1.3. DIRECTIVAS EUROPEAS SOBRE RESIDUOS, ENERGÍA Y COMBUSTIBLES**

La energía es un aspecto muy importante para la Unión Europea y, por tanto, ha elaborado directivas para la consecución de objetivos a largo plazo. Por ejemplo, cabe citar la Directiva Europea (2009/28) que fija como objetivos para el año 2020 que el 20% de la energía global provenga de fuentes renovables y que la generación de gases de efecto invernadero se reduzcan en un 20% respecto a niveles de 1990 [7]. Asimismo, ya se está preparando una nueva directiva que comprenderá el período entre 2020 y 2030 y que marcará unos objetivos más ambiciosos.

Con respecto a los residuos, la Directiva Europea 2018/850 establece que los estados miembros de la Unión Europea deben adoptar las medidas necesarias para garantizar que los residuos municipales depositados en vertederos se reduzcan al 10% o a un porcentaje inferior para el año 2035 [8]. Además, la Directiva 2018/851 fija para el mismo año citado anteriormente que un mínimo del 65% de los residuos generados sean destinados a reutilización o reciclado [9].

Es por ello que la revalorización energética de los residuos, en especial los municipales e industriales, jugará un papel importante para la consecución de tales objetivos, ya que permite mediante una única medida contribuir a disminuir la

problemática, tanto de la generación de energía renovable como de la gestión de residuos, dando respuesta a los problemas asociados a los mismos.

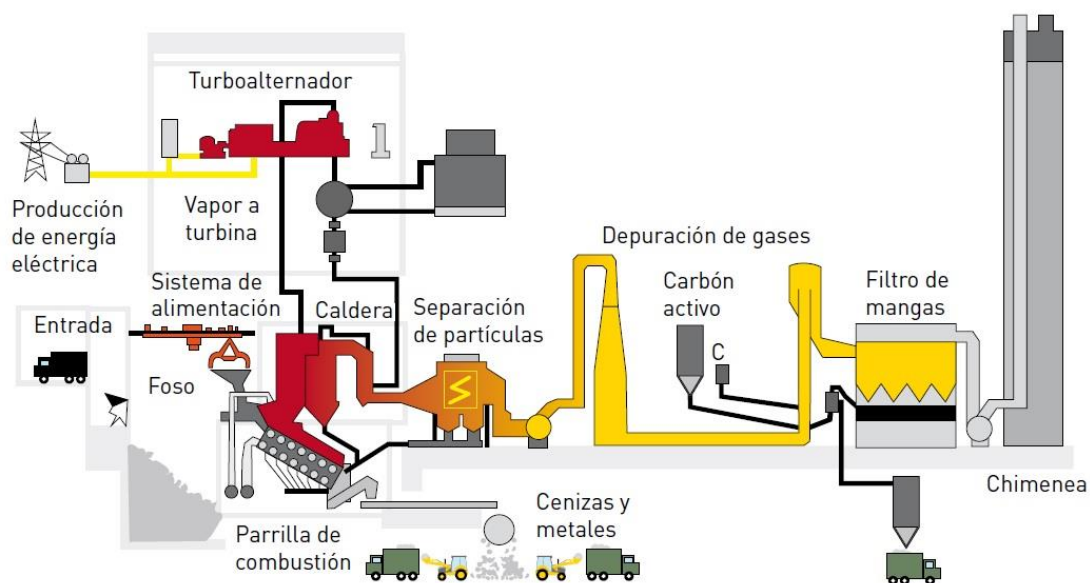
### 1.1.4. ENERGÍA Y COMBUSTIBLES A PARTIR DE RESIDUOS

La transformación de los residuos en energía puede realizarse mediante tecnologías ya existentes, en los que, tradicionalmente, se han empleado recursos y/o combustibles fósiles, con el objetivo de generar electricidad, calor y obtener biocombustibles y bioproductos. Según el procesado al que se sometan los residuos se pueden clasificar en tres tipos: termoquímicos, fisicoquímicos y bioquímicos.

#### 1.1.4.1. Procesos termoquímicos

Las tecnologías que tratan los residuos mediante procesos termoquímicos son las más extendidas actualmente [10]. Los tratamientos más importantes englobados dentro de esta categoría son la incineración, la pirólisis y la gasificación.

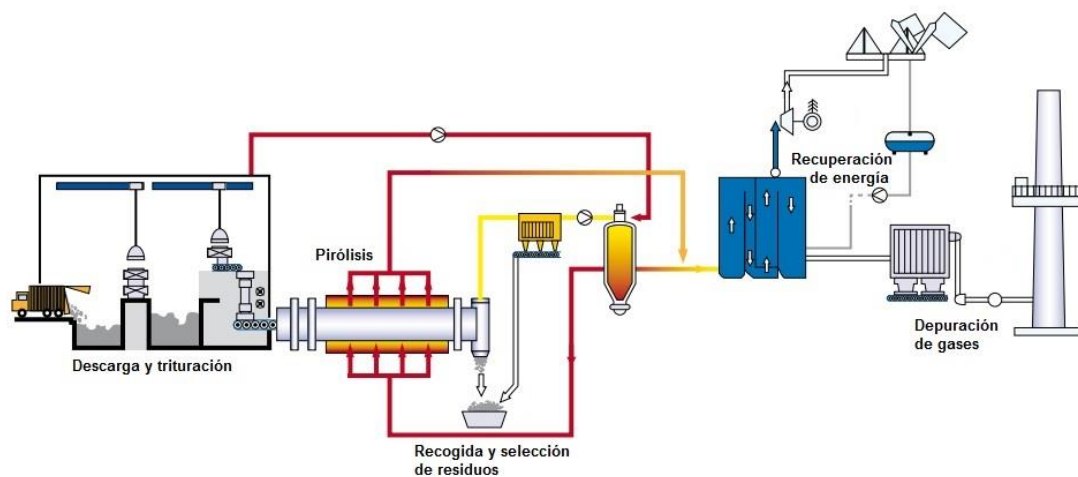
La incineración, cuya instalación se esquematiza en la Figura 3, es la forma más habitual de valorización energética en España [10], especialmente para residuos municipales (según la Ley 22/2011 denominados residuos domésticos [11]) y mediante su combustión se producen gases calientes, tales como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y trazas de otros gases [12], que pueden ser utilizados para calentar agua (por ejemplo, de calefacción) o generar electricidad junto con un sistema de turbina de vapor y alternador. Sin embargo, poco a poco está siendo sustituida por tecnologías de pirólisis y gasificación, debido a su bajo rendimiento energético y la emisión de gases de efecto invernadero [10].



**Figura 3.** Esquema de una planta de incineración [10].

La pirólisis y la gasificación, cuyas instalaciones se esquematizan en las Figuras 4 y 5, respectivamente, son procesos termoquímicos similares. En el primer caso, el tratamiento se realiza en ausencia de oxígeno (a excepción del contenido en el propio residuo) y a temperaturas menores que en la gasificación. No todos los residuos son aptos para la pirólisis, aunque la idoneidad de ellos depende en gran medida del tipo de reactor utilizado en el proceso. En general, los residuos más aptos son aquellos con alto contenido en fibra como papel, cartón, astillas de madera y desechos orgánicos de jardinería, entre otros [10].

Los productos obtenidos son un gas combustible compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO), CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>) e hidrógeno (H<sub>2</sub>), una fracción líquida compuesta por hidrocarburos de cadena larga (alquitranes, fenoles, ceras, etc.) y un sólido con un alto contenido en carbono denominado coque [13]. Si bien el combustible obtenido puede ser transformado en energía eléctrica, parte de esa energía se emplea como aporte de calor, algo necesario para el desarrollo del proceso, y que reduce significativamente su eficiencia.

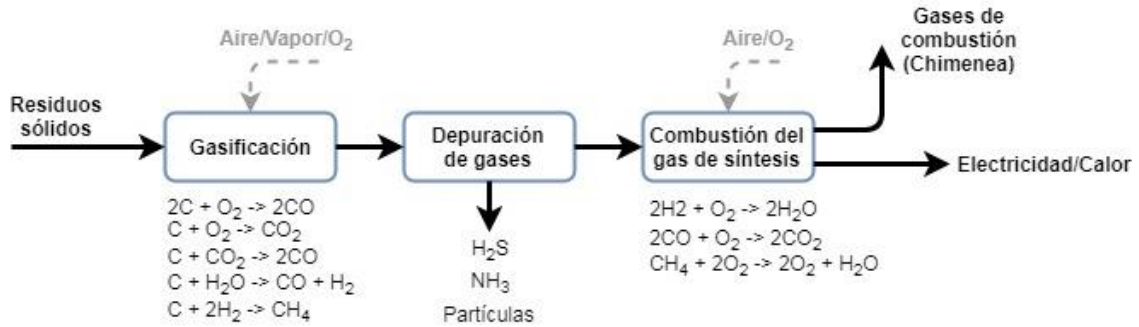


**Figura 4.** Esquema de una planta de pirólisis [10].

La gasificación (véase Figura 5) consiste en una oxidación parcial de la materia orgánica en presencia de una cantidad de oxígeno menor a la estequiométrica. Los residuos aptos para este procesado deben ser sólidos orgánicos y con alta cantidad de carbono [10], como la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) o los residuos sólidos agroindustriales.

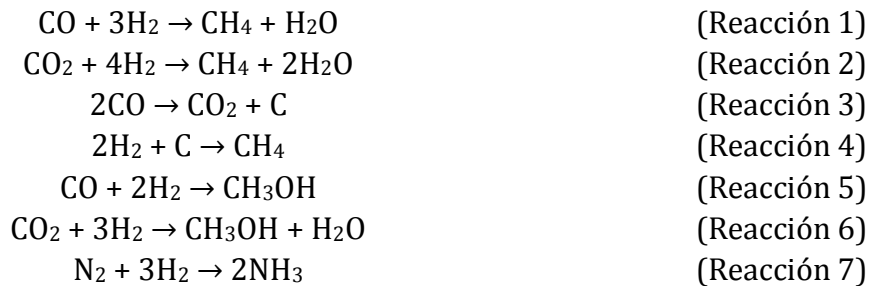
A pesar de que las temperaturas alcanzadas durante el proceso de gasificación son más altas que en la pirólisis, las cuales se sitúan por encima de los 750°C, dando lugar a un aporte calorífico mayor, existen ciertas ventajas que pueden resultar de interés. Éstas tienen que ver con la menor generación de alquitranes, aceites y otros

hidrocarburos líquidos y la obtención de un gas, denominado de síntesis, compuesto principalmente por CO e H<sub>2</sub>.



**Figura 5.** Esquema del proceso de gasificación para la generación de electricidad o calor. Adaptado de bibliografía [10].

El gas de síntesis puede ser empleado para la generación de energía eléctrica mediante su combustión, utilizado en pilas de combustible recuperando previamente el H<sub>2</sub> mediante la eliminación del CO, o como sustituto del gas natural, denominado gas natural sintético (GNS), mediante las reacciones de la 1 a la 4 [14], siendo las dos primeras reacciones de metanación. Asimismo, resulta de gran interés en la industria petroquímica para la producción, principalmente, de metanol (véase reacciones 5 y 6) y amoníaco (reacción 7) [10, 15].

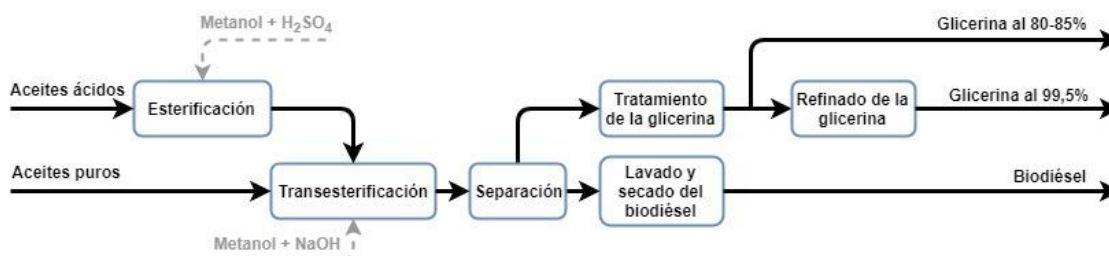


#### 1.1.4.2. Procesos físico-químicos

El proceso químico de valorización de residuos más extendido es la transesterificación catalítica, que se esquematiza en la Figura 6 junto con los procesos físicos y químicos complementarios para la obtención de biodiesel y glicerina, y se emplea específicamente para la transformación de biomasa oleaginosa residual, es decir, residuos con un alto contenido lipídico.

A lo largo del proceso global, los aceites y grasas residuales se hacen reaccionar con alcoholes de bajo peso molecular, habitualmente metanol o etanol, en presencia de un catalizador alcalino (KOH o NaOH) [16]. Como resultado se obtiene principalmente biodiesel, que puede ser mezclado con diesel y usado de forma

normal en motores de combustión [17], y un pequeño porcentaje de glicerina, muy apreciada en la industria cosmética y, durante la primera mitad del siglo XX, por ser la base para la síntesis de la nitroglicerina.



**Figura 6.** Esquema básico de los procesos para la obtención de biodiésel. Elaboración propia.

La problemática de la transesterificación de aceites residuales radica en la necesidad de mayores temperaturas durante el proceso que con aceites vegetales no usados [18] y un pretratamiento denominado esterificación para disminuir la acidez de los aceites y evitar la formación de jabones (saponificación) [16].

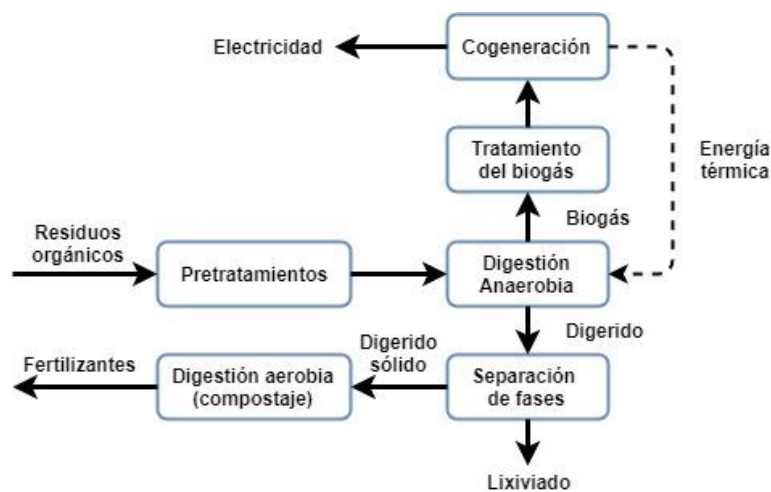
### 1.1.4.3. Procesos bioquímicos

En las tecnologías que emplean procesos bioquímicos, los residuos orgánicos son tratados por microorganismos que los descomponen en otros productos. Si bien, básicamente, podemos diferenciar tres procesos: la fermentación alcohólica, la digestión anaerobia y la digestión aerobia, ésta última realmente no constituye una forma de valorización energética de los residuos, ya que no produce una energía útil o un biocombustible. Sin embargo, resulta de gran utilidad como postratamiento de la fracción sólida del digerido de la digestión anaerobia posibilitando su reducción volumétrica, higienización y desodorización para su posterior gestión [19].

La fermentación alcohólica es uno de los procesos bioquímicos más antiguos que se conoce. Se lleva a cabo en ausencia de  $O_2$  y es originado por la actividad de microorganismos que procesan los hidratos de carbono, generalmente azúcares de tipo hexosa como, por ejemplo, glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ), fructosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) o sacarosa ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ), para obtener etanol ( $C_2H_5OH$ ) y  $CO_2$ . El etanol producido tiene un amplio abanico de aplicaciones que van desde la fabricación de productos para el hogar y la higiene personal hasta el uso como aditivo en las gasolinas.

La digestión anaerobia, también denominada biometanización, es un proceso bioquímico en ausencia de oxígeno, donde los microorganismos, en unas condiciones óptimas para su desarrollo y proliferación, metabolizan la materia orgánica descomponiéndola y transformándola en otros compuestos orgánicos diferentes de mayor utilidad. Mediante este proceso se consigue un combustible

gaseoso llamado biogás y formado básicamente por un porcentaje alrededor del 55-70% de  $\text{CH}_4$  y un 30-45% de  $\text{CO}_2$  [20]. Además, se obtiene un subproducto semisólido rico en nitrógeno y fósforo, que después de un proceso de separación de fases y una digestión aerobia (compostaje), puede ser utilizado como fertilizante agrícola. Los residuos habitualmente más utilizados y adecuados para la digestión anaerobia son los procedentes de actividades agrícolas y ganaderas, la fracción orgánica de los residuos urbanos y los fangos procedentes del tratamiento de aguas residuales.



**Figura 7.** Esquema de los procesos para la obtención de biogás y fertilizantes [10].

En la Figura 7 se puede ver un esquema de los procesos dados en una planta para obtener biogás, con el que producir energía eléctrica y térmica, ésta última utilizada para el funcionamiento del reactor anaerobio. Además, se obtiene un subproducto, el digerido, que puede ser empleado como fertilizante.

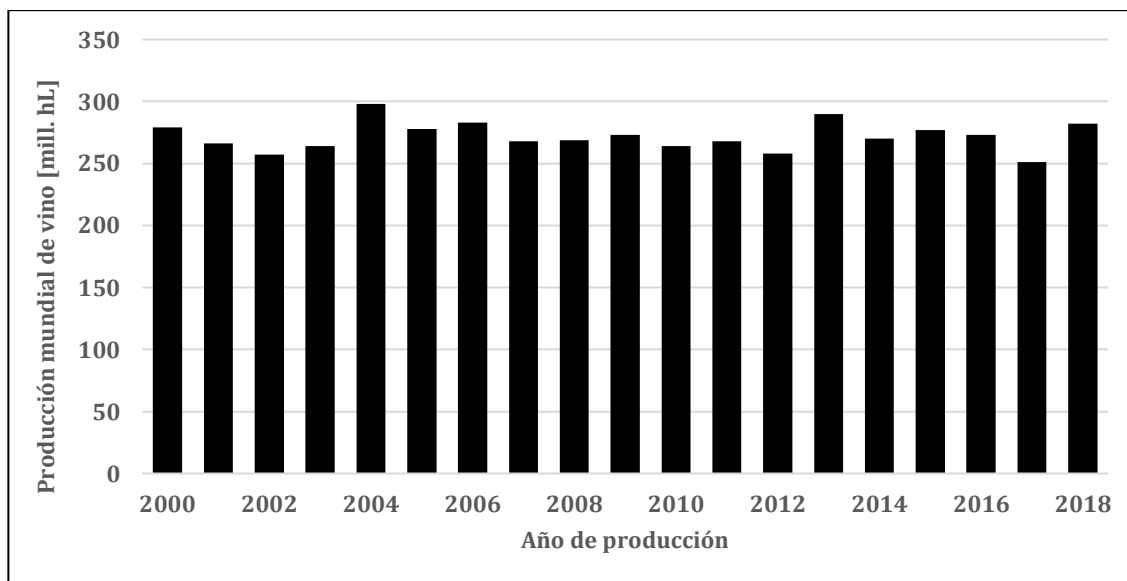
## 1.2. EL SECTOR VINÍCOLA

Al igual que cualquier sector industrial, el vinícola también requiere de energía para elaborar su producto, el vino, que, por ende, genera residuos. En los siguientes apartados se desarrollan los aspectos más importantes acerca de esta industria, tales como la producción, la generación de residuos y el consumo energético.

### 1.2.1. SITUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL Y NACIONAL DE VINO

Según la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV), la producción mundial de vino en el año 2018, último registrado, se situó en los 282 millones de hectolitros (mill. hL), lo que supone un aumento del 12% respecto al año anterior, con una producción históricamente baja [21]. A pesar de este aumento, relativamente pronunciado, del año 2018, la producción se puede considerar estable a lo largo de los últimos 15 años (véase la Figura 8), teniendo en cuenta que

el alza o baja de las cantidades producidas pueden explicarse en su mayor parte, por condiciones climáticas desfavorables [22]. Como ejemplos, cabe mencionar que, en Sudamérica, el fenómeno El Niño provocó la caída en la cantidad de uva recogida en la cosecha de 2016 [22] y en el año 2017 países como Alemania, España, Francia o Italia registraron también descensos en la producción como consecuencia de los temporales.

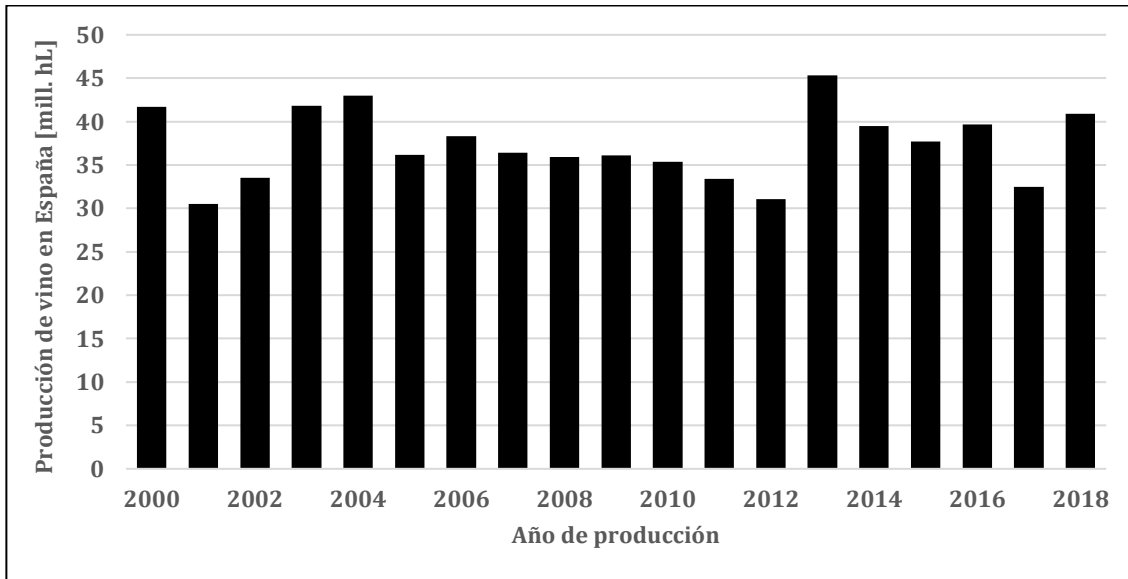


**Figura 8.** Producción mundial de vino para los años comprendidos entre 2000 y 2018. Adaptado de la bibliografía [21, 23].

A nivel nacional la producción sí experimenta variaciones importantes de hasta un 30% entre años consecutivos, tal como se refleja en la Figura 9. Aunque durante este siglo siempre se ha situado entre valores de 30 y 45 mill. hL de vino. En el caso de España, aun siendo el tercer mayor productor del mundo por detrás de Francia e Italia, sucesos medioambientales o meteorológicos importantes como los mencionados anteriormente suponen una reducción notable en la recogida de uva y, por tanto, en la producción de vino.

Debido a que el proyecto desarrollado a lo largo de este documento está basado en su aplicación a los residuos generados en bodegas inscritas dentro de la Denominación de Origen Calificada Rioja, en el siguiente apartado se definen las características generales de esta denominación y algunos aspectos importantes que se han tenido en cuenta para justificar, en parte, la realización de este proyecto.





**Figura 9.** Producción de vino en España para los años comprendidos entre 2001 y 2018. Elaboración propia [21, 23].

### 1.2.2. DENOMINACIÓN DE ORIGEN CALIFICADA RIOJA

La región que abarca la Denominación de Origen Calificada Rioja (D.O.Ca. Rioja) está situada en el norte de España, y ambos lados del río Ebro. La orografía ha delimitado de forma clara la extensión de la denominación, en especial en La Rioja Alta y Rioja Alavesa, donde los Montes Obarenes y la Sierra de Cantabria por el norte y el Sistema Ibérico por el sur, marcan los límites [24].



**Figura 10.** Mapa de la Denominación de Origen Calificada Rioja [25].



De extensión aproximada de 100 km de largo y 40 km en su sección más ancha, los viñedos alcanzan una altitud máxima de 700 m y se incluyen en municipios de 3 provincias (Álava, La Rioja y Navarra) organizados en 3 subregiones: Rioja Alavesa, Rioja Alta y Rioja Baja, tal como se muestra en la Figura 10. En cada una de ellas imperan unas condiciones, tanto climáticas como geológicas, diferentes. En la Rioja Alavesa predomina la influencia del clima atlántico y los suelos arcillo-calcáreos, situados en terrazas y pequeñas parcelas. En La Rioja Alta también predomina el clima atlántico, mientras que sus suelos se reparten entre los arcillo-calcáreos, arcillo-ferrosos y aluviales. La Rioja Baja, en cambio, posee un clima más seco y cálido debido a la influencia mediterránea, siendo en ella más frecuentes los suelos aluviales y arcillo-ferrosos [24].

Las variedades de uva autorizadas por la denominación son tempranillo, garnacha, graciano, mazuelo y maturana, en uvas tintas, y viura, malvasía, garnacha blanca, tempranillo blanco, maturana blanca, turruntés, chardonnay, sauvignon blanc y verdejo, en uvas blancas. De todas ellas, la más característica y que ocupa el 75% de la superficie de cultivo, es el tempranillo [26].

Uno de los rasgos diferenciadores de los vinos de Rioja es la gran aptitud que poseen para el envejecimiento, cualidad exclusiva de los grandes vinos. A través de un adecuado proceso de crianza que se realiza en barricas de roble de 225 L, denominadas barricas bordelesas, la madera juega un papel decisivo exaltando sus virtudes y confiriéndole nuevas características aromáticas y de sabor. Además, la crianza se completa después en botella, donde el vino sigue evolucionando, en un ambiente casi anaerobio, hasta alcanzar su plenitud [27].

Según el proceso de envejecimiento seguido se establecen cuatro categorías, diferenciadas mediante precintas numeradas y que el Consejo Regulador otorga a aquellos vinos que han superado sus controles de calidad y tipicidad [27]. A continuación, se listan, en orden de mayor a menor crianza, dichas categorías [28, 29].

- **Gran Reserva:** Son aquellos vinos que han sido criados durante un período total de 5 años con un mínimo de 2 años en bodega bordelesa, de características anteriormente citadas, y 2 años en botella. En vinos blancos el período de crianza es de 4 años, de los cuales 6 meses como mínimo son en bodega.
- **Reserva:** Corresponde a vinos muy seleccionados con una crianza mínima entre bodega bordelesa y botella de 3 años, de los cuales 1 al menos en bodega, seguida y complementada con un envejecimiento en botella de 6 meses como mínimo. En vinos blancos y rosados el período de crianza mínimo se reduce a 2 años, de los cuales debe permanecer en bodega al menos 6 meses. No se establece un período mínimo de estancia en botella.

- **Crianza:** Son denominados así los vinos que se comercializan a partir de su tercer año, es decir, han permanecido al menos durante 2 años en bodega, envejeciendo en todo momento o no. La crianza obligatoria se fija en 1 año para vinos tintos en barricas bordelesas y de 6 meses para vinos blancos y rosados. No se establece un período mínimo de estancia en botella.
- **Garantía de origen:** Son el resto de vinos que no pueden ser clasificados en alguna de las anteriores categorías. Suelen ser vinos en su primer o segundo año que no han sido envejecidos o en los que su crianza no llega a los mínimos establecidos para las otras categorías. Éstos últimos suelen nombrarse como vinos de autor.

En la actualidad, las bodegas adscritas a la D.O.Ca. Rioja producen una media anual de entre 280 y 300 mill. L de vino provenientes de uvas recogidas en una extensión de 63.593 hectáreas de viñedo [24]. Uno de los objetivos de la Denominación se centra en la calidad del producto que, a pesar de una producción pequeña (entre un 6 y un 10% comparada con la producción nacional), hace que sus ventas constituyan alrededor del 37% del valor del mercado [30]. Sin embargo, en ese afán por conseguir vinos de calidad, la D.O.Ca. Rioja establece una normativa estricta en la recolección de la uva, que hace referencia a rendimientos máximos en uva tinta y uva blanca de 6.500 y 9.000 kg por hectárea, respectivamente [24], y en su posterior transformación en vino, relacionado con un rendimiento máximo de 0,7 L de vino por cada kg de uva [31], que origina una formación de residuos muy alta. A esto hay que sumar que muchas bodegas optan por rendimientos menores, ya sea en la recolección de uva o en la elaboración del vino, en la búsqueda de vinos aún de mayor calidad o con características especiales. Ello incrementa todavía más la generación de residuos y motiva, en gran parte, su utilización en este proyecto para su revalorización.

### 1.2.3. LA INDUSTRIA VINÍCOLA

La industria vinícola constituye el conjunto de actividades técnicas y económicas que permiten la transformación de la uva en vino y su posterior comercialización, así como de las instalaciones en donde se llevan a cabo. En términos estrictos, la industria vinícola no engloba las actividades agrícolas asociadas a la producción de la uva.

#### 1.2.3.1. El proceso de vinificación

La vinificación es el proceso mediante el cual la uva se transforma en vino. Previamente la uva ha tenido que ser recolectada de la vid en su punto óptimo de maduración, asociada a una relación entre azúcar y acidez adecuadas, y transportada a la bodega durante la vendimia. Se puede vendimiar de forma manual o con máquina. Indudablemente resulta más económico y, sobre todo, menos

problemático alquilar/comprar una máquina que contratar a un grupo de operarios, pero el resultado no es el mismo [32]. Vendimiar a mano redundará en la calidad final del vino.

Otro punto importante es el transporte hasta la bodega. Lo ideal es que el trayecto sea lo más corto posible para asegurar la integridad de la uva. Sin embargo, en ocasiones, la distancia de los viñedos a las bodegas es grande. En estos casos, se debe proteger la uva vendimiada para que no sufra grandes modificaciones en su composición. Una vez que la uva llega a la bodega, se pesa la cosecha, se examina visualmente para estimar la sanidad de la uva, se toma una muestra para su análisis en laboratorio (pH, acidez, contenido de azúcares y polifenoles, etc.) y se clasifica en función de su calidad. A partir de aquí comienza su procesamiento según el tipo de vino al que se destine: tinto o blanco y rosado [32].

### a) Vinificación en tinto

En la elaboración del vino tinto se emplean dos procesos diferentes: el de maceración carbónica (elaboración con el racimo entero) y el despalillado (eliminación del raspón)/estrujado (desgranando los racimos).

El primero es utilizado generalmente para elaborar vinos jóvenes de carácter muy afrutado, mientras que el segundo suele utilizarse en vinos de mayor calidad que, habitualmente, son sometidos a un proceso posterior de envejecimiento [33].



**Figura 11.** Esquema básico del proceso de vinificación en tinto mediante maceración carbónica. Elaboración propia.

Las diferencias entre ambos tipos de vinificación ocurren en las primeras etapas. En la maceración carbónica (véase Figuras 11 y 12) las uvas, sin despalillar ni estrujar, son introducidas en los depósitos o cubas. El peso de las uvas superiores aplasta a las inferiores extrayendo su mosto y comenzando la fermentación alcohólica que, además, libera CO<sub>2</sub>. Este gas desplaza al O<sub>2</sub> y da comienzo al proceso propiamente dicho de la maceración carbónica [34, 35].



**Figura 12.** Fase de maceración carbónica. El mosto fermenta en contacto con el raspón, el hollejo y el CO<sub>2</sub> liberado previamente [36].

Una vez terminado este proceso, el vino fermentado es separado por gravedad y por prensado de las partes sólidas (raspones (rama), hollejos (piel de la uva) y pepitas) siendo retirados, a continuación, del depósito en una tarea denominada descube. El vino se traslada a nuevos depósitos donde se realiza una nueva fermentación, en este caso maloláctica, en la cual el ácido málico se transforma en ácido láctico rebajando su acidez y otorgándole un carácter más agradable [35].



**Figura 13.** Esquema básico del proceso de vinificación en tinto mediante despalillado y estrujado. Elaboración propia.

En el otro tipo de vinificación, resumido a modo de esquema en la Figura 13, los racimos son despojados del raspón o escobajo (la parte más leñosa del racimo) mediante el despalillado (véase Figura 14).



**Figura 14.** Despalilladora/estrujadora en funcionamiento. A la derecha se recoge el raspón y a la izquierda la uva estrujada [37].

A continuación, las uvas ya desgranadas, son estrujadas para romper su hollejo, es decir, la piel de la uva y, así, permitir la salida de gran parte del mosto para que pueda iniciarse la fermentación alcohólica. A diferencia de la maceración carbónica, ésta se produce en ausencia del raspón y únicamente en contacto con los hollejos y pepitas [33]. A partir de esta etapa, el vino sigue un camino similar al de la maceración carbónica, con el prensado y descube seguido de la fermentación maloláctica.

Una vez han completado los procesos fermentativos anteriores, tanto para la vinificación mediante maceración carbónica o mediante despalillado y estrujado, con objeto de eliminar los restos sólidos sedimentados y en suspensión, los cuales le pueden otorgar al vino sabores poco agradables y un aspecto menos atractivo, es necesario realizar el trasiego y la clarificación. Las tareas de trasiego consisten en el trasvase del vino de un depósito a otro, evitando de esta manera que los sólidos sedimentados, es decir, las lías o madres, le acompañen [33, 38]. La clarificación se realiza para arrastrar los sólidos en suspensión y se utilizan clarificantes, tales como, clara de huevo, cola de pescado o sangre animal [39]. A partir de este momento el vino ya puede ser embotellado y comercializado en el caso que no fuera destinado a su envejecimiento.

#### **b) Vinificación en blanco y rosado**

Para la elaboración de los vinos blancos y rosados (véase Figura 15) se utilizan tanto uvas de piel blanca como de piel tinta. Una vez los racimos son despalillados, las uvas



se estrujan para liberar su mosto que, a continuación, macera en contacto con los hollejos.



**Figura 15.** Esquema básico del proceso de elaboración del vino blanco y rosado. Elaboración propia.

En el caso de los vinos blancos, la maceración apenas dura entre 12 y 16 h evitando que, en caso de emplear uvas de variedades tintas, el mosto obtenga coloración de los pigmentos contenidos en los hollejos. En los vinos rosados, la maceración se mantiene durante más tiempo, unas 24 h, aportándole ese color rosáceo. A partir de este punto, los procesos de elaboración de ambos tipos de vino son los mismos [40]: un prensado para la extracción del mosto ya macerado, seguido de la fermentación alcohólica en un depósito o cuba y donde, en algunos casos, también se efectúa la fermentación maloláctica. Una vez completada la fermentación, el vino se trasiega y clarifica con el fin de eliminar los sedimentos depositados y los sólidos suspendidos, respectivamente, y se embotella para su comercialización.

La mayoría de los vinos blancos y rosados no suelen ser sometidos a períodos de envejecimiento, especialmente los últimos, aunque sí es habitual que la fermentación de éstos no se realice en depósitos sino directamente en barricas de roble, logrando con ello un aporte de nuevos aromas procedentes de la madera a los ya existentes aromas frutales de la uva [41].

### 1.2.3.2. Residuos generados

Tal y como se ha mencionado en el último párrafo del apartado 1.2.2., la D.O.Ca. Rioja establece unos rendimientos máximos de producción de 6.500 y 9.000 kg por hectárea de uva tinta y blanca, respectivamente, y de transformación uva-vino de 70 L de vino por cada 100 kg de uva. Estas restricciones, especialmente las primeras, hacen que los residuos generados, tanto en los viñedos como en las bodegas, sean más elevados que en otras regiones vinícolas no adscritas a una denominación de origen. A modo de ejemplo, tal como se ilustra en la Figura 16, la gran producción de uva en las viñas durante la vendimia del año 2016 provocó que los viticultores tuvieran que desechar en los propios viñedos el excedente [42], que bien podría haberse utilizado para otras aplicaciones distintas a la elaboración de vino, entre ellas, la generación de energía.



**Figura 16.** Uva tirada en uno de los renques en una viña de La Rioja [42].

El cálculo aproximado de generación de residuos durante la vinificación se puede realizar mediante la ecuación 1, suponiendo que la densidad del es vino de 1 kg/L, ya que suele estar comprendida entre 0,988 y 0,995 kg/L [43, 44], y porque el valor establecido facilita el cálculo y permite asumir que el error cometido es despreciable.

$$m_r = m_u - V_v \cdot \rho_v \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde,

$m_u$  es la masa de uva producida, en kg,

$V_v$  es el volumen de vino producido, en L,

$\rho_v$  es la densidad del vino, en kg/L y

$m_r$  es la masa de residuos generados, en kg.

Los datos consultados en la Memoria elaborada por la D.O.Ca. Rioja del año 2018 [45], última publicada, para la masa de uva producida y el volumen de vino producido corresponden a valores de 485.854.620 kg y 336.124.391 L, respectivamente. La sustitución de estos datos en la ecuación 1 proporciona la expresión que a continuación se establece:

$$m_r = 485.854.620 \text{ kg} - 336.124.391 \text{ L} \cdot 1 \text{ kg/L} = 149.730.229 \text{ kg}$$

Por tanto, la masa de residuos generados en la elaboración de vino por las bodegas adscritas a la D.O.Ca. Rioja para la cosecha de 2018 se situaría en torno a los 149.730.229 kg. En otras palabras, cada año, aproximadamente, se generan casi 150.000 toneladas (t) de residuos durante la vinificación, procedentes únicamente de la uva que llega a bodega. Este valor sería aún mayor si se consideraran los excedentes desechados en la viña o los residuos de elementos empleados durante los procesos de vinificación, como en la clarificación o en las operaciones de limpieza, entre otros.

En aras de la realización de este proyecto, conviene describir de forma general, los residuos principales, aprovechables o no, para su reciclado o revalorización, que son generados en una bodega. Estos son:

**a) Raspón**

El raspón (también llamado escobajo) es la estructura que mantiene unidos entre sí las uvas o bayas y comunica el racimo con la vid. A través de los vasos conductores de su interior sirve de medio para la alimentación de los frutos. Constituye del 3 al 7% del peso del racimo [46] y básicamente se compone de agua y de material vegetal que se va lignificando con el tiempo formando un material más leñoso. Su contenido relativamente alto de taninos le da un sabor astringente y herbáceo al vino [47].

**b) Orujo**

El orujo u orujos, que en La Rioja se suele denominar también oruja, son los restos de hollejos, pepitas y pulpa que quedan después del prensado de la uva y que no se utilizarán para la elaboración del vino. En ciertas ocasiones, puede incluir el raspón cuando no se realiza el despalillado (retirada de los raspones) de los racimos. Según el grado de prensado y la variedad de la uva el porcentaje de orujo obtenido varía significativamente, entre un 15% y un 40% del peso total del racimo [48].

En la elaboración de vinos blancos, donde la fermentación ocurre después del prensado de la uva, el orujo producido es dulce y fresco, sin contenido de alcohol. En el caso de los vinos tintos, el mosto fermenta junto con los hollejos y pepitas (y en la vinificación mediante maceración carbónica también junto al raspón) antes del prensado y, por tanto, el orujo contendrá alcohol, denominándose orujo fermentado. Cuando éstos se destilan para obtener su alcohol, el orujo final es orujo agotado o destilado [48].

**c) Lías de fermentación**

Se llaman lías (también madres o heces) a los sedimentos que precipitan en el fondo del depósito cuando el vino está en reposo. Su origen puede ser la decantación de sustancias vegetales provenientes de la vendimia y levaduras y bacterias de los



procesos de fermentación o, bien, sedimentos desarrollados en las propias barricas, como, por ejemplo, azúcares y ácido málico no fermentados. En otras ocasiones, las sustancias precipitadas se deben a la insolubilización de determinados compuestos contenidos en los vinos: proteínas coaguladas por los taninos de la madera, polisacáridos insolubilizados por el alcohol, etc. Sin embargo, son más frecuentes los precipitados de sales del ácido tartárico y de taninos polimerizados [49].

#### **d) Aguas residuales**

El agua interviene de forma esencial en el proceso productivo del vino. No de manera directa sobre el producto, sino que es utilizada mayoritariamente para la limpieza de los útiles, instrumentos, equipos y maquinaria necesarios en la vinificación, así como en la refrigeración de los depósitos. Un dato a tener en cuenta es que el consumo de agua no se reparte equitativamente a lo largo del año, sino que se concentra alrededor de un 60% durante los 3 meses posteriores a la vendimia [50], cuando la uva recogida es transformada en vino.

La cantidad de agua utilizada durante los procesos varía enormemente entre países europeos y España. Las bodegas españolas, incluidas, por tanto, las de la D.O.Ca. Rioja, consumen entre 3 y 6 veces más en comparación con los demás países europeos. De este modo, mientras en países de tradición vitivinícola como Italia o Francia consumen 1 L de agua por L de vino elaborado, en España se puede llegar a consumir de 3 a 6 L de agua por L de vino elaborado. Esto implica que se generen hasta un 500% más de aguas residuales [50], con el consiguiente sobrecoste en su depuración, además un dimensionamiento excesivo de las plantas depuradoras. Hay varios motivos que fomentan este derroche, entre los que destacan el bajo precio del agua y la falta de concienciación de las personas que trabajan en las bodegas.

Considerando únicamente la Comunidad Autónoma de La Rioja, hay más de 1.800 bodegas inscritas con capacidad de elaborar aproximadamente 250 mill. L de vino anuales. Por lo tanto, si en lugar de consumir 1 L de agua por cada L de vino elaborado, se triplica este dato, se habrán malgastado innecesariamente 500 mill. L de agua.

#### **e) Otros residuos y contaminantes**

A lo largo de todo el proceso de vinificación se generan otros residuos y contaminantes que, a pesar de no ser considerados de utilidad para el desarrollo de este proyecto, son convenientes mencionarlos debido a su peligrosidad: el CO<sub>2</sub> y los compuestos sulfurosos.

El CO<sub>2</sub> o, coloquialmente, denominado tufo en la industria vinícola, se genera durante la fermentación alcohólica y supone el mayor riesgo al que están expuestos los trabajadores [50], especialmente en bodegas antiguas excavadas en el subsuelo

que hacen difícil su ventilación. A pesar de que no es tóxico, salvo en altas concentraciones, es más denso que el aire y se acumula en las zonas más bajas, desplazándolo. Provoca primero la inconsciencia y después, la muerte por asfixia [51].

También es necesario tener en cuenta el uso de compuestos sulfurosos en la elaboración del vino. Habitualmente se emplea metabisulfito potásico ( $K_2S_2O_5$ ) directamente sobre las uvas o diluido en el mosto antes de la fermentación, como precursor de la formación de  $SO_2$ , que favorece el proceso fermentativo, proporciona color y aroma al vino y reduce su oxidación y acidez. Sin embargo, constituye un riesgo en su manipulación, así como para algunas personas asmáticas [52]. También se utiliza azufre como biocida sobre la madera en las operaciones de limpieza de barricas [53]. La normativa europea exige que figure en la etiqueta la leyenda “contiene sulfitos” si se han empleado compuestos sulfurosos durante la elaboración o envejecimiento del vino.

Otros residuos de menor importancia son envases de productos, restos de aditivos, de clarificantes, barricas viejas o deterioradas, cristal, corcho, cartón, plásticos de embalajes, palés, aceites y todo aquello que se genera en los espacios de oficinas. Deberán gestionarse adecuadamente según su condición de Peligroso o No Peligroso a través de gestores autorizados.

### 1.2.3.3. Consumo energético en una bodega

A lo largo de todas las actividades vitivinícolas, desde los trabajos en las propias viñas hasta los procesos en la bodega, se utilizan máquinas o herramientas que demandan energía. En los trabajos de campo, donde la energía eléctrica es de difícil abastecimiento, los combustibles son la fuente principal para alimentar vehículos y máquinas, mientras que en bodega el consumo es mayoritariamente eléctrico. En la Tabla 1 se relacionan las máquinas y herramientas más habituales utilizadas en cada etapa con el tipo de energía consumido.

**Tabla 1.** Tipo de consumo energético en vehículos y máquinas. Adaptado de la bibliografía [54-56].

Lugar	Proceso	Equipamiento	Tipo de combustible/Energía
Campo/Viña	Recolección	Tractores y vehículos	Gasóleo
		Máquinas vendimiadoras	
Bodega	Recepción de la uva	Báscula	Electricidad
		Tolva	
		Despalilladora y estrujadora	
	Prensado	Bombas	Electricidad
		Escurridoras	
		Prensa	

**Tabla 1.** Tipo de consumo energético en vehículos y máquinas. Adaptado de la bibliografía (continuación) [54-56].

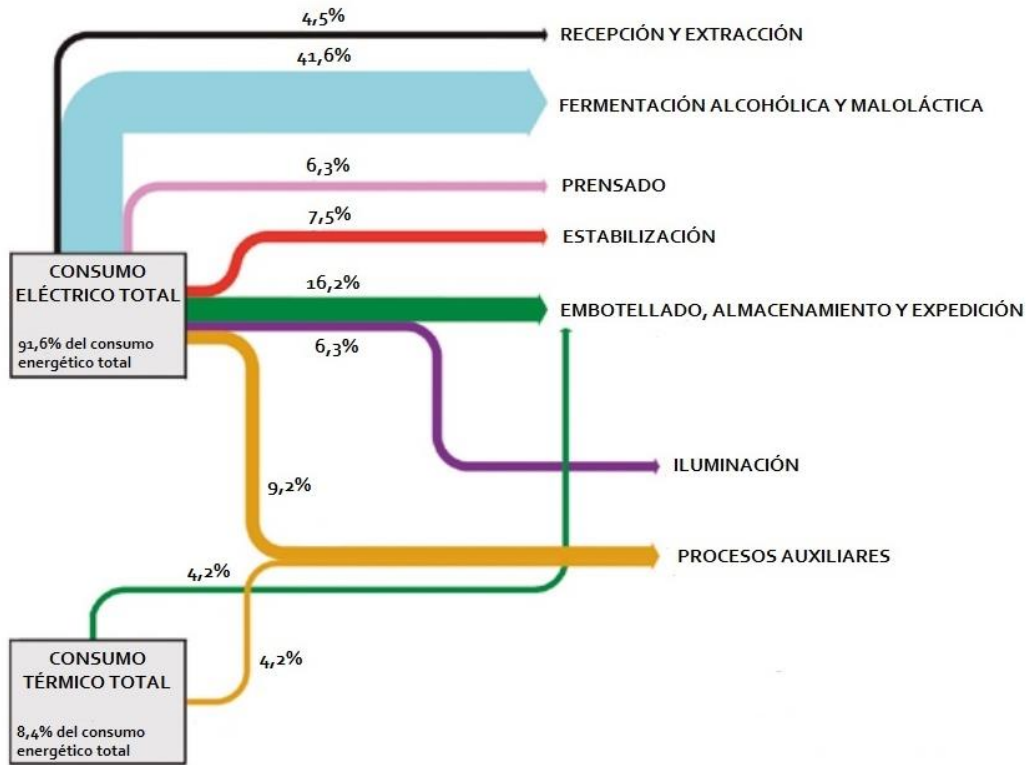
Lugar	Proceso	Equipamiento	Tipo de combustible/Energía
Bodega	Fermentación alcohólica y maloláctica	Bombas	Electricidad
		Sistema de enfriado	
		Sistema de enfriado auxiliar	Gasóleo
		Otros elementos (sensores, oxigen., intercamb., etc.)	Electricidad
	Filtrado, clarificación, estabilización y embotellado	Filtros	Electricidad
		Sistema de enfriado	Gasóleo
		Sistema de enfriado auxiliar	
		Embotelladora	Electricidad
		Encapsuladora	
	Etiquetadora		
	Oficinas, tienda y laboratorios	Iluminación	Electricidad
		Climatización	Electricidad/Gasóleo/Gas Natural
		Agua caliente sanitaria	
		Equipos informáticos	Electricidad
		Equipos del laboratorio	
Otras operaciones	Compresores (aire compr.)	Electricidad	
	Carretillas elevadoras	Electricidad/Gasóleo	
	Otras herramientas		

Según un proyecto de la organización Cooperativas Agro-Alimentarias [55] en el que se auditaron ocho bodegas con características diferentes, el consumo medio de combustibles se sitúa en el 8% del consumo energético total y el de electricidad el 92% restante. Atendiendo únicamente al consumo eléctrico en las etapas de la vinificación, la fermentación constituye casi la mitad, un 45%, el embotellado y almacenamiento representa un 18%, la estabilización, filtrado y clarificación suponen un 8%, el prensado un 7% y la recepción un 5%. El restante 17% es consumido por las oficinas, tienda y laboratorio y otras operaciones [55]. Los consumos elevados coinciden con los procesos donde la refrigeración es un aspecto crucial para la elaboración del vino: fermentación, estabilización y embotellado. En la Figura 17 se representa el consumo energético de una bodega de tamaño medio mediante un diagrama de Sankey.

En el mismo estudio, y con un espectro analizado de veinte cooperativas situadas en diferentes comunidades autónomas de España, se publicó el consumo eléctrico promedio según el tamaño de la cooperativa, cuyos resultados aparecen reflejados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Consumo eléctrico promedio según tipología de la bodega [55].

Tamaño de la cooperativa	Producción anual (hL/año)	Consumo eléctrico (kWh)
<b>Pequeñas</b>	< 25.000	158.148
<b>Medianas</b>	entre 25.000 y 50.000	285.442
<b>Grandes</b>	> 50.000 hL	450.109



**Figura 17.** Diagrama de Sankey del consumo energético de una bodega de tamaño medio [56].

A partir de los datos de la Tabla 2, el coste anual, en euros, de la energía eléctrica consumida en una bodega de pequeño tamaño, la más habitual en la D.O.Ca. Rioja, y utilizando un precio medio del kWh de 0,106 €, obtenido de cuatro distribuidoras para la tarifa 3.1A [57-60] y suponiendo un consumo constante en cada uno de los tramos tarifarios (punta, llano y valle), sería de 16.769 €. Para bodegas de tamaño medianos y grandes los costes anuales serían de 30.267 € y 47.727 €, respectivamente. A estos importes habría que sumar los gastos asociados a la energía eléctrica como potencia contratada, impuestos, peajes o alquiler de equipos, que incrementa sobremanera la factura eléctrica a pagar.

En base a estos últimos datos, y a que durante el proceso de vinificación se producen residuos biomásicos, que hace referencia, en este caso concreto, a aquellos que se generan en la propia bodega, se pretende su revalorización mediante la digestión anaerobia. Este tratamiento, tal como se ha comentado previamente, presenta, frente al resto de tratamientos, las ventajas de obtener, por una parte, un combustible de origen biomásico que, además, proviene de residuos, que puede ser fácilmente almacenado y, por lo tanto, utilizado en cualquier momento, con el beneficio de una reducción de la factura energética. Y, por otra parte, se obtiene un subproducto de alto poder fertilizante que resulta de gran utilidad, especialmente, para las industrias agroalimentarias como, en este caso, una bodega.

## 2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

---

La calidad y la alta valoración del vino de Rioja han provocado que la industria vinícola se sitúe como uno de los motores económicos más importantes de La Rioja. Es comprensible, por tanto, que alrededor de un 30% de toda la superficie de cultivo agrícola de la comunidad autónoma esté ocupada por viñedos, los cuales casi el 100% se destinan a la producción de vino [61].

El objetivo de este trabajo busca principalmente la revalorización de los residuos orgánicos producidos durante la elaboración del vino en una bodega de tamaño pequeño para la obtención de dos subproductos, los cuales se obtienen mediante la digestión anaerobia, proceso bioquímico desarrollado en los apartados 3 y 4 junto a sus rangos condiciones de operación, tipos de digestores e instalaciones auxiliares y/o anejas. Concretamente estos dos productos son:

- Biogás que permita disminuir los costes energéticos de la bodega. Este producto, tal y como se indica en el apartado 5.1.3, aunque tiene muchas aplicaciones, se ha establecido emplearlo como combustible en una instalación de cogeneración para producir energía térmica y eléctrica que permita un ahorro energético dentro de la propia bodega.
- Digerido con alto valor fertilizante que puede ser utilizado en los viñedos pertenecientes a la propia bodega o ser comercializados. En este caso se indicará la idoneidad de este producto como fertilizante para el suelo donde la bodega tiene sus viñedos.

El trabajo engloba, por tanto, a lo largo de los apartados y subapartados siguientes:

- 1) La caracterización y adecuación de los residuos orgánicos generados en la vinificación para su posterior tratamiento mediante la digestión anaerobia, cuyos datos iniciales se han obtenido de la bibliografía. Para este proceso se calculará la cantidad de aditivos para mantener un pH y una alcalinidad óptima que permitan que este se produzca en condiciones adecuadas.
- 2) El diseño y dimensionamiento del reactor, el cual permitirá determinar la temperatura a mantener en el digestor, teniendo en cuenta la tasa de pérdida de calor que se produce en el sistema, y la cantidad de biogás generado. Este último dato permitirá, además, calcular la capacidad de autoconsumo de la bodega.
- 3) Elección de los sistemas auxiliares y/o anejas de la instalación de digestión anaerobia asociadas a, pretratamientos de la materia prima (residuo), cómo la trituración, y los postratamientos requeridos, como la purificación del biogás obtenido, teniendo en cuenta, en este último caso, el uso final que se le va a dar tanto al biogás, como al digerido.

## 3. LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

---

### 3.1. DESCRIPCIÓN Y FUNDAMENTOS

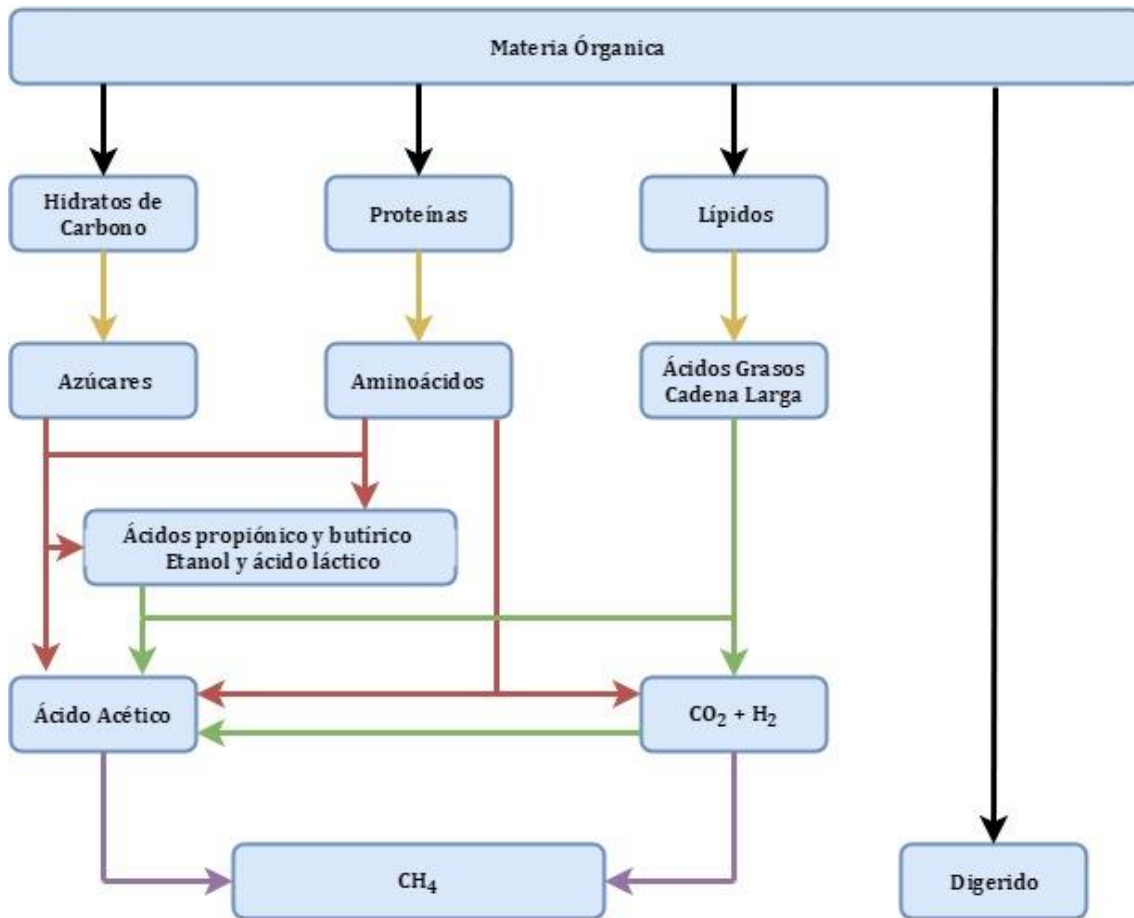
Tal y como se ha descrito, la digestión anaerobia, o biometanización, es un proceso bioquímico en ausencia de oxígeno por el cual se produce la degradación de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos [62]. En concreto, se trata de una fermentación donde las bacterias actúan como catalizadores en la descomposición de la materia orgánica, dando lugar a una mezcla de gases, en su mayor parte formada por  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , denominada biogás, y un subproducto líquido/sólido rico en compuestos inorgánicos llamado digerido o digestato.

Tal y como ya se ha comentado, mediante el proceso de digestión anaerobia puede tratarse un gran número de residuos orgánicos tales como: agrícolas y ganaderos, agroindustriales, fangos de depuradoras biológicas, aguas residuales municipales e industriales, la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) [63], etc.

Además de las ventajas que suponen de por sí los subproductos generados mediante la digestión anaerobia, se pueden enumerar otras razones para valorizar de esta manera los residuos orgánicos, tales como, eliminación de olores, reducción de sólidos y de microorganismos patógenos, conversión de nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal, el cual es más fácilmente asimilable por las plantas, cumplimiento de la normativa medioambiental [62], dar respuesta a las directivas sobre uso de energías renovables, residuos, biocombustibles, eficiencia energética, etc.

### 3.2. ETAPAS DEL PROCESO

La digestión anaerobia se divide en cuatro etapas, que se esquematizan en la Figura 18, y que se desarrollan en los siguientes apartados siguiendo el orden temporal en el que comienzan a producirse, aunque en realidad estas etapas se superponen en el tiempo, es decir, no suceden una detrás de otra, sino que van solapándose a medida que avanza el proceso [62]. Estas son, en orden cronológico: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.



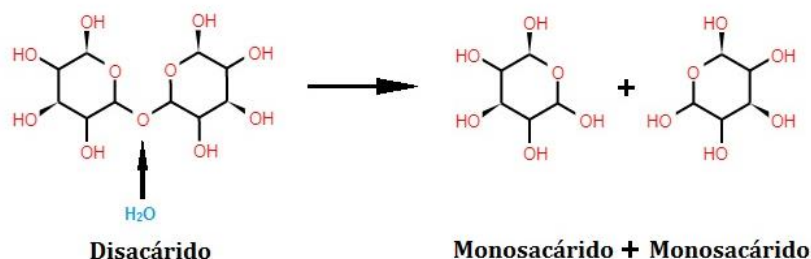
**Figura 18.** Fases y productos de la digestión anaerobia: hidrólisis (en amarillo), acidogénesis (en rojo), acetogénesis (en verde) y metanogénesis (en morado). Adaptado de la bibliografía [62].

### 3.2.1. HIDRÓLISIS

La primera etapa de la digestión anaerobia es la hidrólisis. En ella se produce, en presencia de H<sub>2</sub>O, la ruptura de moléculas complejas, como hidratos de carbono, proteínas y lípidos, para formar otras más pequeñas, sencillas y solubles (véase la Figura 19 donde se presenta la hidrólisis de un disacárido (carbohidrato) llevada a cabo mediante enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas [20]). En otras palabras, los polímeros son convertidos en sus respectivos monómeros, fácilmente asimilables como fuente de energía por las células de las bacterias anaerobias.

Esta etapa suele ser la limitante para el proceso, especialmente en sustratos con alto contenido en sólidos, porque es aquí donde se generan los nutrientes en la forma adecuada para poder ser metabolizados por las bacterias específicas de las siguientes etapas [64]. Se puede considerar que la velocidad de producción de biogás es proporcional a la velocidad de asimilación de la materia orgánica por las bacterias [65, 66].

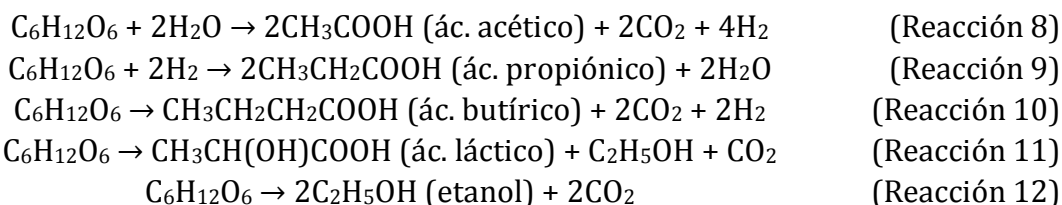




**Figura 19.** Proceso de hidrólisis de un disacárido para producir dos monosacáridos. Elaboración propia.

### 3.2.2. ACIDOGÉNESIS

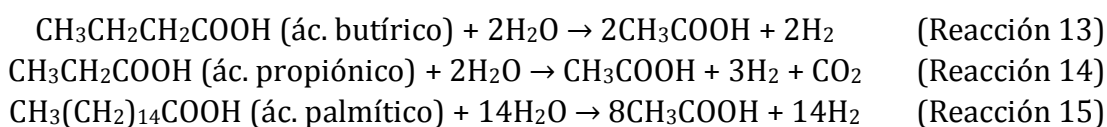
Durante esta etapa las moléculas orgánicas solubles, tanto aquellas generadas en la hidrólisis (a excepción de los ácidos grasos de cadena larga) como las que ya existieran inicialmente en la materia orgánica, son asimiladas por las bacterias acidogénicas. Así, los azúcares y aminoácidos son degradados para formar ácido acético, propiónico y butírico, fundamentalmente, según las reacciones 8, 9 y 10, respectivamente, además de dar lugar a mezclas de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, y otros elementos como etanol y ácido láctico, mediante las reacciones 11 y 12, respectivamente [66].



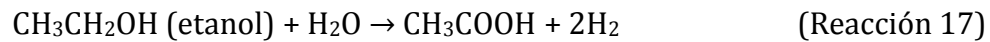
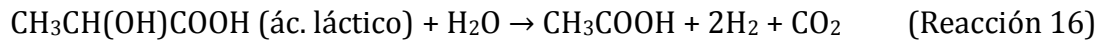
Tanto el ácido acético como el H<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> podrán ser directamente utilizados por las bacterias metanogénicas, mientras que los ácidos propiónico y butírico, así como el etanol y el ácido láctico, deberán ser oxidados previamente por las bacterias acetogénicas antes de ser metabolizados en la etapa de metanogénesis.

### 3.2.3. ACETOGÉNESIS

Los ácidos grasos volátiles, como los ácidos propiónico y butírico, principalmente, (reacciones 13 y 14, respectivamente), los ácidos grasos de cadena larga, como el ácido palmítico (reacción 15), y el ácido láctico y el etanol (reacciones 16 y 17, respectivamente), formados en las etapas de hidrólisis y acidogénesis, se convierten en ácido acético y mezclas de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> por la acción de las bacterias acetogénicas [66].







En esta fase también actúan otras bacterias formadoras de ácido acético, llamadas homoacetogénicas, según la reacción 18, que, al contrario que las anteriores, no producen  $\text{H}_2$  como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen. Éstas, además, permiten disminuir la presión parcial del  $\text{H}_2$  manteniendo la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas [20].



Debido a que el  $\text{H}_2$  en esta etapa actúa como inhibidor del proceso, las bacterias acetogénicas también viven en colaboración con las bacterias metanogénicas, consumidoras de  $\text{H}_2$ .

### 3.2.4. METANOGENÉISIS

La metanogénesis es la etapa final del proceso de digestión anaerobia. Los microorganismos que actúan en este proceso son los únicos estrictamente anaerobios y producen  $\text{CH}_4$  a partir del ácido acético, el  $\text{H}_2$  y el  $\text{CO}_2$  generado en las fases de acidogénesis y acetogénesis.

La producción de  $\text{CH}_4$  puede seguir dos vías: la primera, la acetoclástica, también denominada acetotrófica, por la que el ácido acético se transforma en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  (véase reacción 19); y la segunda, la hidrógenotrófica (véase reacción 20), mediante la cual el  $\text{H}_2$  y el  $\text{CO}_2$  forman  $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}$  [66].



El porcentaje de producción de  $\text{CH}_4$  por vía acetoclástica supone alrededor del 70% del total del  $\text{CH}_4$  generado, mientras que el restante 30% se realiza por vía hidrógenotrófica [67].

### 3.3. PARÁMETROS AMBIENTALES Y OPERACIONALES

Para que los procesos o fases dados en la digestión anaerobia se realicen de forma óptima, y con el fin de maximizar los beneficios de este tratamiento (producción de biogás, relación  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ , eliminación de olores y patógenos, reducción de volumen, etc.), se deben considerar ciertos parámetros, tanto ambientales o propios de las características fisicoquímicas del sustrato, como operacionales o propios de las condiciones de trabajo del reactor. Se hace necesario, por tanto, considerar previamente los valores más adecuados de estos parámetros, llevar un control continuo de aquellos que su desviación suponga un mayor riesgo para el desarrollo

de la digestión anaerobia y, en los casos en que esto suceda, ajustarlos con inmediatez.

### 3.3.1. TEMPERATURA

La temperatura es un factor de gran importancia debido a que influye directamente en la velocidad de crecimiento de los microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica. A medida que ésta aumenta, la velocidad de crecimiento y las reacciones enzimáticas también lo hacen, por lo que está directamente ligada con la producción de biogás [20] y su composición, debido a la dependencia de la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura. Sin embargo, una temperatura demasiado elevada puede dañar irremediamente proteínas u otros elementos [68]. Por tanto, es necesario trabajar a una temperatura en la cual se consiga una buena producción de biogás sin dañar la materia orgánica.

En el proceso de digestión se puede trabajar en tres rangos de temperatura [20]:

- Psicrófilico, por debajo de 25°C
- Mesófilico, entre 25°C y 45°C
- Termófilico, entre 45°C y 65°C

La temperatura recomendada para cada régimen es: 20°C en psicrófilico, 35°C en mesófilico y 55°C en termófilico [69].

Debido a que los rangos de temperatura donde las bacterias metanogénicas trabajan óptimamente son 29-37°C y 48-60°C, los regímenes más utilizados son el mesófilico y el termófilico [70]. El uso del primero está más extendido, aunque en los últimos tiempos hay una tendencia hacia el segundo, ya que la velocidad de generación de biogás es más rápida permitiendo operar en ciclos más cortos (véase Tabla 3) y con menores volúmenes, además de que la eliminación de materia orgánica y microorganismos patógenos es mayor. Sin embargo, el proceso se vuelve más sensible a variaciones de temperatura que implican un coste mayor de los digestores y problemas de inhibición por compuestos que se vuelven más tóxicos a altas temperaturas, tales como el nitrógeno amoniacal y los ácidos grasos de cadena larga [20].

**Tabla 3.** Relación de la temperatura y el tiempo de digestión [69].

Temperatura (°C)	15	20	25	30	35	40	45	50	60
Tiempo (días)	67,8	46,6	37,5	33,3	23,7	22,7	14,4	8,9	12,6

Aun así, cambios bruscos de temperatura son perjudiciales en cualquiera de los regímenes de temperatura en los que se opere. Por ello, para garantizar una

temperatura homogénea dentro del reactor se recomienda instalar un sistema de agitación y control. Una variación de apenas unos grados afectaría negativamente a la actividad metanogénica consumidora de ácidos, pero no tanto a la acidogénica, produciéndose un desequilibrio que haría descender el pH y a la larga tendría efectos inhibitorios [70]. En general, se aceptan variaciones máximas de la temperatura de  $\pm 2$  °C/día en régimen mesofílico y de  $\pm 0,5$  °C/día en régimen termofílico [69].

### 3.3.2. pH

El pH es un parámetro fundamental para el óptimo desarrollo de los microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica. Como todas las fases de la digestión anaerobia dependen del resto de fases, si una falla, fallarán las demás. El rango de valores óptimo para el pH se muestra a continuación [64]:

- Hidrólisis: pH entre 7,2 y 7,4.
- Acidogénesis: pH entre 5,5 y 6,5.
- Acetogénesis: pH entre 7,0 y 7,2
- Metanogénesis: pH entre 6,5 y 7,5.

El valor recomendado del pH de la materia orgánica para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente es de 7,0, pudiendo fluctuar, sin inhibir ninguna de las fases, entre 6,5 y 7,5 [64].

En la Figura 20 se visualiza la influencia del pH en la producción de biogás, alcanzando el máximo para valores del pH en torno a 7, para un mismo sustrato y una temperatura de operación dentro del rango mesofílico. Los resultados son obtenidos en un digestor anaerobio discontinuo a escala de laboratorio.

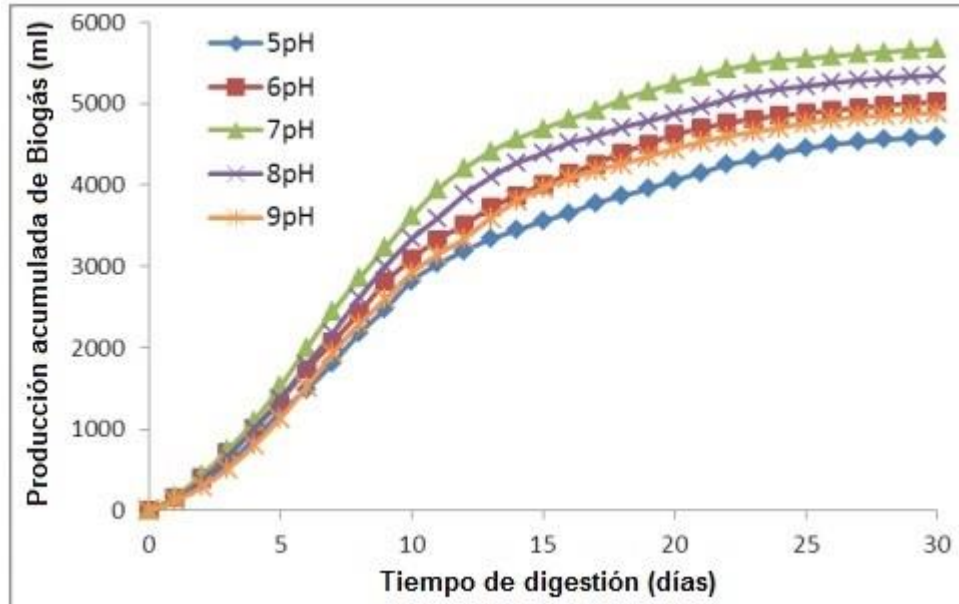
Un buen control del pH durante el proceso no solo influye en el volumen de generación de biogás, sino que también contribuye a que la proporción de CH<sub>4</sub> sea lo más alta posible (véase Tabla 4).

**Tabla 4.** Influencia del pH en el porcentaje de CH<sub>4</sub> en el biogás [71].

pH	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
<b>CH<sub>4</sub> (% en volumen)</b>	56,7	58,6	60,8	60,1	59,4

Un pH bajo, es decir, acidificado, podría indicar un desequilibrio entre la producción y el consumo de ácidos grasos volátiles que llevaría a una inhibición de los microorganismos metanogénicos, los más sensibles del proceso, provocando como resultado la obtención de un biogás pobre en CH<sub>4</sub> y, por tanto, con peores propiedades energéticas [72]. Regenerarlos llevaría semanas o incluso meses, por lo que se hace imprescindible monitorizar los niveles de pH y ajustarlos ante

posibles desviaciones mediante aditivos, para evitar su descenso fuera del rango recomendado.



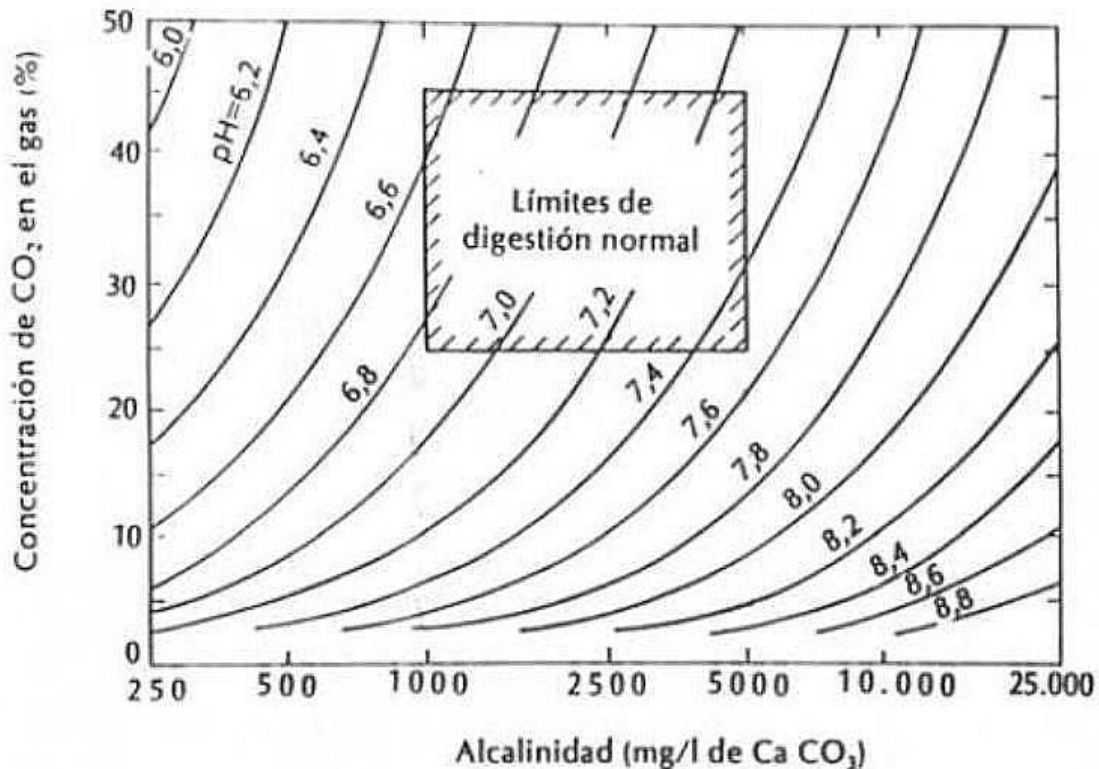
**Figura 20.** Influencia del pH en la producción de biogás [70].

### 3.3.3. ALCALINIDAD

La alcalinidad está estrechamente relacionada con el pH ya que cuantifica la capacidad de un medio para neutralizar ácidos manteniendo el pH lo más estable posible. Valores de alcalinidad superiores a 2.500 mg CaCO<sub>3</sub>/L permiten al sustrato amortiguar el descenso del pH y dotar de una adecuada estabilidad al proceso de digestión anaerobia [73]. Sin embargo, valores superiores a 6.500 mg CaCO<sub>3</sub>/L afectan negativamente sobre la actividad bacteriana debido a la formación de sales que resultan tóxicas [73]. En la Figura 21 se muestran los límites de pH, alcalinidad y concentración de CO<sub>2</sub> para una digestión anaerobia correcta.

La alcalinidad del sustrato puede ser incrementado mediante agentes alcalinizantes, los cuales pueden ser de dos tipos [74]:

- Aquellos que ofrecen directamente alcalinidad en forma bicarbonatada como el bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>) o el bicarbonato de amonio (NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>).
- Aquellos que reaccionan con el CO<sub>2</sub> para ofrecer alcalinidad bicarbonatada como el hidróxido de sodio (NaOH), el óxido de calcio (CaO) o el hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>).



**Figura 21.** Influencia del pH, alcalinidad y CO<sub>2</sub> en la digestión anaerobia [75].

La monitorización de la alcalinidad del sustrato se hace incluso más necesario que la del pH, ya que es un parámetro más fácil de controlar. Esto se debe a que la escala de medición del pH es logarítmica, pequeños descensos suponen una gran variación en la acidez del sustrato y, por tanto, una descompensación entre la generación y el consumo de ácidos [76], que habitualmente resulta imposible de corregir. En cambio, la escala de la alcalinidad es lineal, permitiendo un control y una corrección previa a la variación del pH a medida que el sustrato “consume” alcalinidad.

### 3.3.4. POTENCIAL REDOX

El potencial redox, o potencial de reducción-oxidación, cuantifica un ambiente químico reductor u oxidante, es decir, si en él se favorecen las reacciones químicas reductoras, en las cuales se ceden electrones o, por el contrario, se favorecen las reacciones oxidantes, cuando se aceptan electrones. La unidad de medida de esta magnitud son los milivoltios (mV). Cuando el valor del potencial redox es negativo, el ambiente es reductor, mientras que, en el caso de valores positivos, el ambiente se considera oxidante.

Para asegurar el buen crecimiento de todos los microorganismos de la digestión anaerobia y, especialmente los metanogénicos que son los más restrictivos, se recomienda mantener un ambiente fuertemente reductor de entre -200 mV y -350

mV [75]. En sustratos en los cuales el potencial redox no sea lo suficientemente bajo, se hace necesario adicionar compuestos reductores (véase Tabla 5) para acondicionarlo. Los más utilizados son la cisteína-HCl y el sulfuro de sodio [75, 77].

**Tabla 5.** Compuestos reductores más utilizados [59].

Compuesto	Fórmula química	Potencial redox
<b>Tioglicolato de sodio</b>	$C_2H_3NaO_2S$	-100 mV
<b>Cisteína-HCl</b>	$C_3H_8ClNO_2S$	-210 mV
<b>Ditiotreitol</b>	$C_4H_{10}O_2S_2$	-330 mV
<b>Ti (III) citrato</b>	$C_7H_{10}O_7Ti$	-480 mV
<b>Sulfuro de sodio</b>	$Na_2S$	-571 mV

El potencial redox, junto con la producción de biogás, son parámetros que permiten obtener información del grado de inhibición de los microorganismos metanogénicos debido a concentraciones tóxicas de algunos metales [78]. Por lo tanto, la alta eficiencia del proceso de digestión anaerobia está directamente relacionada con un bajo potencial redox. Sin embargo, es un parámetro poco medido en reactores industriales, ya que su instalación es costosa y requiere un mantenimiento frecuente [79].

### 3.3.5. MACRONUTRIENTES. RELACIONES CARBONO, NITRÓGENO Y FÓSFORO: C/N y N/P

La demanda de nutrientes, que sirven de alimentación para la flora microbiana que se encarga de realizar la digestión anaerobia, es sensiblemente inferior a la necesaria para la digestión aerobia, o compostaje, como consecuencia de la baja velocidad de crecimiento de los microorganismos [64]. Sin embargo, estos nutrientes, tanto en forma de compuestos orgánicos como inorgánicos, deben estar presentes en las cantidades adecuadas en el sustrato para posibilitar la correcta proliferación de los microorganismos.

A partir del contenido en el sustrato de carbono, el nutriente principal en cualquier proceso bioquímico, se establecen las relaciones óptimas de otros elementos para el buen funcionamiento de la digestión anaerobia. Por tanto, se hace necesario conocer las relaciones, en peso, de carbono-nitrógeno (C/N) y de nitrógeno-fósforo (N/P).

Aunque los datos para la relación C/N varían considerablemente según los autores consultados [20, 64, 80], la mayoría coincide en establecer como valores óptimos los cercanos a 25 o en un rango de 20 a 30. Valores elevados de C/N implican escasez de nitrógeno que, en consecuencia, limitaría el desarrollo de las bacterias. En caso contrario, un exceso de nitrógeno podría generar cantidades elevadas de amoníaco y amonio provocando la inhibición del proceso.

El fósforo juega un papel fundamental en el crecimiento y metabolismo de las bacterias anaerobias debido a que forman parte de las enzimas que participan en la



producción de  $\text{CH}_4$  [64]. En este caso, se establece que la relación N/P debe estar comprendida entre 5 y 7, ya que las bacterias anaerobias consumen aproximadamente entre 5 y 7 veces más nitrógeno que fósforo [20, 63, 81].

Algunos autores incluyen el azufre dentro de la consideración de macronutriente, suscitando que interviene del mismo modo que lo hace el fósforo, y estableciendo las cantidades óptimas en el sustrato para que se vea favorecida la fase de metanogénesis. Además, sugieren que la afinidad del azufre con los metales solubilizados en la humedad del sustrato, la forma más inhibitoria, provoca la formación de sulfuros metálicos que precipitan debido a su insolubilidad y permiten su eliminación. Así, recomiendan relaciones nitrógeno-azufre (N/S) entre 5 y 10 [64, 70].

Sin embargo, cantidades elevadas de azufre, en forma de sulfatos y otros compuestos sulfurosos oxidados, inhiben especialmente la etapa de metanogénesis, debido a que las bacterias sulfato-reductoras transforman estos compuestos en ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), utilizando como nutrientes  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$  y compitiendo con las bacterias metanogénicas por ellos. El resultado de esta competencia es importante porque afecta determinantemente al rendimiento de la producción de  $\text{CH}_4$  [82]. El  $\text{H}_2\text{S}$ , además, resulta tóxico para las bacterias anaerobias, particularmente las metanogénicas [20], por lo que se hace más necesario controlar el exceso de azufre en el sustrato de alimentación.

### 3.3.6. MICRONUTRIENTES

Además de los macronutrientes, considerados en el apartado anterior y que constituyen la mayor parte de la alimentación de las bacterias anaerobias, se debe considerar la presencia de determinados elementos o compuestos, contenidos en el propio sustrato o producidos en las reacciones de la digestión, que según su concentración pueden resultar de ayuda al proceso o provocar un efecto inhibitorio, ya sea leve, moderado o grave.

Hay que tener en cuenta que el efecto producido por estos compuestos es debido, únicamente, por aquellos que se encuentran disueltos en el medio acuoso del sustrato, es decir, disociados en su fase líquida y, por tanto, la concentración total de éstos en todo el sustrato será mucho mayor que la disuelta.

En la Tabla 6 se muestran aquellas concentraciones de diferentes iones para las cuales se produce la estimulación o la inhibición del proceso. La bibliografía consultada [20, 62, 70, 84-86] acota, con unos márgenes suficientemente concretos, los valores para los cuales la digestión anaerobia es favorecida, inhibida moderadamente o inhibida severamente cuando se trata de iones de metales alcalinos y alcalinotérreos como el sodio, el calcio, el potasio y el magnesio.

**Tabla 6.** Concentraciones estimulantes e inhibitorias para algunos metales alcalinos y alcalinotérreos [20, 70, 84, 86].

Iones	Estimulante (mg/L)	Inhibición moderada (mg/L)	Inhibición alta (mg/L)
<b>Sodio (Na<sup>+</sup>)</b>	100-200	3.500-5.500	8.000
<b>Calcio (Ca<sup>2+</sup>)</b>	100-200	2.500-4.500	8.000
<b>Potasio (K<sup>+</sup>)</b>	200-400	2.500-4.500	12.000
<b>Magnesio (Mg<sup>2+</sup>)</b>	75-150	1.000-1.500	3.000

Sin embargo, para los iones de metales pesados como el cobre, cromo, níquel y zinc, los autores difieren ampliamente entre sí cuando aportan datos, tal como se muestra en la Tabla 7. Ello puede ser causado, entre otros motivos, por la menor o mayor presencia de azufre o de elementos antagonistas en el sustrato de digestión que alteran la cantidad precipitada de estos metales [83].

**Tabla 7.** Concentraciones inhibitorias para algunos metales pesados [20, 62, 70, 84-86].

Iones	Inhibición moderada (mg/L)	Inhibición alta (mg/L)
<b>Cromo (Cr<sup>3+</sup>)</b>	-	180-260
<b>Cromo (Cr<sup>6+</sup>)</b>	10	50-250
<b>Níquel (Ni<sup>2+</sup>)</b>	200-250	420
<b>Cobre (Cu<sup>2+</sup>)</b>	50-100	200
<b>Zinc (Zn<sup>2+</sup>)</b>	-	30-150

De cualquier manera, y aunque conviene prestar atención a las concentraciones de estos elementos en el sustrato a digerir, tal como se ha mencionado anteriormente, el efecto inhibitorio es provocado únicamente por el porcentaje de estos elementos que se encuentra disuelto [84] en la alimentación. Por lo que, si el sustrato no tiene una procedencia específica donde cabría esperar una alta concentración de metales, no deberían suponer problemas durante todo el proceso.

Además, algunos autores consideran de efecto beneficioso para el proceso la presencia de trazas de otros elementos como el cobalto, hierro, molibdeno, manganeso, selenio, wolframio, boro, etc. Sin embargo, la bibliografía disponible [20, 62, 70, 84-86] apenas aporta datos al respecto por lo que no se considerarán.

### 3.3.7. AGITACIÓN

Para poder obtener unos niveles de producción de biogás próximos a la producción teórica para el tipo de sustrato empleado, es conveniente mantener el medio de reacción homogéneo, es decir, que permita distribuir uniformemente toda la materia dentro del reactor, lo que se consigue mediante el aporte de energía cinética. Esto resulta de especial importancia cuando se trata de sustratos con diferente composición y densidades, provocando el fenómeno de estratificación en el propio reactor. Cuando ocurre la estratificación, la población bacteriana habitualmente se sitúa en la parte inferior del reactor, mientras que el material a

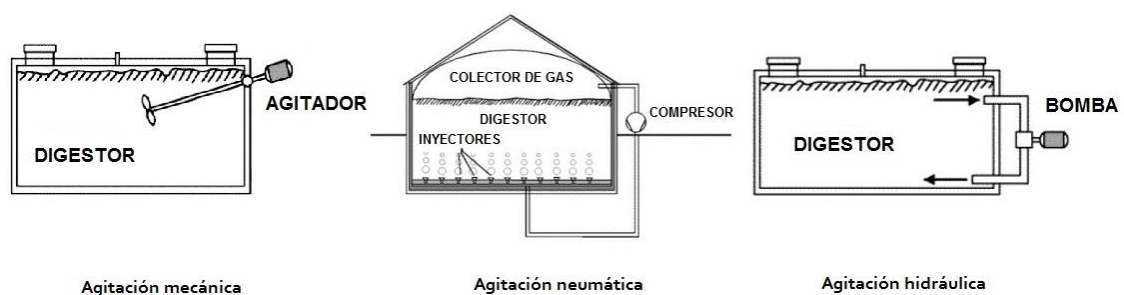


digerir tiende a subir a la parte superior, reduciendo la superficie de contacto entre ambos a la zona fronteriza y, por consiguiente, ralentizando o dificultando la digestión. Además, algunos sólidos son capaces de subir a la superficie donde se mantienen en flotación formando una capa de escoria o costra que dificulta la salida del biogás. Aun siendo de vital importancia la agitación del sustrato, ésta no debe exceder los límites que permitan que los grupúsculos bacterianos sean disgregados, debido a que se produciría una reducción de la velocidad de metabolización de la materia orgánica [87].

A continuación, se enumeran las ventajas de una adecuada agitación [87, 88]:

- Mezclado y homogeneizado del sustrato y el inóculo encargado de acelerar el arranque de la digestión anaerobia, debido a su alto contenido de microorganismos activos de anteriores digestiones.
- Distribución uniforme del sustrato y la población bacteriana durante la digestión.
- Distribución uniforme de la temperatura.
- Distribución homogénea de los inhibidores y tóxicos manteniendo concentraciones bajas.
- Prevención de espumas y costras en la superficie, favoreciendo la salida del biogás generado.
- Prevención de espacios muertos (zonas estancas donde no ocurre la digestión) y de caminos preferenciales.

Fundamentalmente existen 3 tecnologías diferentes para la agitación del sustrato (véase Figura 22), siendo éstas la mecánica, neumática e hidráulica.



**Figura 22.** Tipos de agitación [90].

### 3.3.7.1. Agitación mecánica

El aporte de energía cinética proviene de turbinas o agitadores de paletas o hélices que mediante el giro desplazan y mezclan el sustrato. Pueden funcionar de manera continua o intermitente. Los valores recomendados para la potencia instalada de los equipos de agitación mecánica se sitúan entre 5 y 8 W/m<sup>3</sup> del reactor [62, 87].

Los diferentes tipos de equipos se resumen a continuación.

**a) Agitadores horizontales**

Su uso es el más frecuente, especialmente en digestores verticales de mezcla completa. El eje de rotación está dispuesto en posición horizontal junto al motor eléctrico que, por lo tanto, se encontrará sumergido durante la digestión, haciendo necesario un encapsulado hermético para evitar filtraciones, y una protección frente a la corrosión.

Dependiendo del tamaño de las aspas y la velocidad de rotación, se distinguen dos tipos: propulsores (aspas cortas y alta velocidad) y rotores (aspas largas y baja velocidad), que se ejemplifican en la Figura 23. Son de tamaño reducido, especialmente los del primer tipo, por lo que habitualmente van acompañados por otros, que pueden ser del mismo tipo o no [62, 87].

En cuanto a las características, ventajas y desventajas y conveniencia de uno u otro tipo de agitador, estos aspectos se listan y se describen brevemente en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Características y ventajas e inconvenientes de los agitadores horizontales. Adaptado de la bibliografía [62, 87].

Propulsores	Rotores
<b>Características de operación</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intermitente a altas revoluciones (500 a 1.500 rpm)</li> <li>• Potencia hasta 35 kW</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuo a bajas revoluciones (50 a 120 rpm)</li> <li>• Potencia hasta 20 kW</li> </ul>
<b>Ventajas e inconvenientes</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crea un flujo turbulento que favorece la fragmentación de escorias impidiendo la formación de costra, aunque si el tiempo entre operaciones es excesivo pueden llegar a generarse</li> <li>• Su pequeño tamaño permite un grado de agitación diferente según la zona donde esté colocado</li> <li>• Partes móviles dentro del digestor</li> <li>• Se necesita la apertura del digestor para el mantenimiento</li> <li>• Posible cavitación (creación de burbujas de vapor que implosionan generando vibraciones) en sustratos ricos en materia seca</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realiza una mezcla óptima</li> <li>• No crea flujo turbulento, pero sí una fuerza de cizallamiento mayor</li> <li>• Partes móviles dentro del digestor</li> <li>• Se necesita la apertura del digestor para el mantenimiento</li> </ul>
<b>Conveniencia</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Habitualmente usado en digestores verticales de mezcla completa</li> <li>• Todo tipo de sustratos en digestión húmeda</li> <li>• No conviene para sustratos con viscosidades muy altas</li> <li>• No recomendable para sustratos con elevada materia seca</li> </ul>	



**Figura 23.** Agitadores horizontales. Propulsor (izq.) [90] y rotor (dcha.) [91].

**b) Agitadores de eje largo**

El eje de rotación se posiciona verticalmente, pasando del exterior al interior del reactor a través del techo, u oblicuamente, pasando a través de las paredes. Las aspas pueden estar colocadas a lo largo de dicho eje, cuando se trata de rotores con cuchillas grandes, o en su extremo, en el caso de propulsores con cuchillas pequeñas. Los primeros suelen estar apoyados o fijados al suelo, mientras que los segundos no. El motor eléctrico se encuentra situado fuera del digestor, por lo que no es necesario detener la digestión para el mantenimiento. En ocasiones se complementan con agitadores horizontales con motor sumergido para un mejor mezclado, especialmente en reactores de grandes dimensiones [62, 87]. La Figura 24 muestra algunos ejemplos de agitadores con diferentes combinaciones de las características anteriores.



**Figura 24.** Agitadores de eje largo. Propulsor inclinado (izq. arriba), rotor inclinado (izq. abajo) y rotor vertical (dcha.) [91].

A continuación, en la Tabla 9, se enumeran las características, ventajas e inconvenientes y conveniencia de los agitadores de eje largo.

**Tabla 9.** Características y ventajas e inconvenientes de los agitadores de eje largo. Adaptado de la bibliografía [62, 87].

Propulsores	Rotores
<b>Características de operación</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad media-alta (100 a 300 rpm)</li> <li>• Potencia hasta 30 kW</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuo a bajas revoluciones (10 a 50 rpm)</li> <li>• Potencia entre 2-30 kW</li> </ul>
<b>Ventajas e inconvenientes</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay apenas partes móviles dentro del digestor. Facilidad de mantenimiento</li> <li>• Se puede evitar la formación de costra y sedimentación si el agitado es continuo</li> <li>• La posición fija de los agitadores puede provocar una mezcla incompleta</li> <li>• El motor puede suponer problemas debido al ruido</li> <li>• Se debe vaciar el digestor si los rodamiento o ejes fallan</li> </ul>	
<b>Conveniencia</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todo tipo de sustratos en digestión húmeda</li> <li>• Existen modelos aptos para sustratos con alto contenido de materia seca</li> <li>• Únicamente para digestores verticales</li> </ul>	

**c) Agitadores de paletas**

Trabajan a bajas velocidades y, a diferencia de los rotores de cuchillas (con o sin motor sumergido), el mezclado no se realiza con acciones de cizallamiento, sino que es más bien un amasado del sustrato debido al diseño de la palas, lisas y rectangulares, colocadas a lo largo de un eje. Éste puede estar colocado tanto horizontal como verticalmente, e incluso de manera oblicua, tal como se muestra en los ejemplos de la Figura 25.



**Figura 25.** Agitadores de paletas. Inclinado (izq. arriba) [92], vertical (dcha. arriba) [92] y horizontal (abajo) [91].

Cuando se trata de digestores horizontales y continuos (de flujo pistón), el eje es necesariamente horizontal y ortogonal al sentido del flujo, facilitando el avance del sustrato desde la entrada hasta la salida. Para digestores verticales se utilizan agitadores de paletas tanto verticales como oblicuos [62, 87].

En la Tabla 10 se listan las características, ventajas e inconvenientes y conveniencia de los agitadores de paletas.

**Tabla 10.** Características y ventajas e inconvenientes de los agitadores de paletas [62, 87].

<b>Agitadores de paletas</b>
<b>Características de operación</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intermitente a velocidad baja (alrededor de 10 rpm)</li> <li>• Potencia hasta 5-15 kW</li> </ul>
<b>Ventajas e inconvenientes</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay apenas partes móviles dentro del digestor</li> <li>• Se evita la formación de costra y sedimentación</li> <li>• La posición fija de los agitadores puede provocar una mezcla incompleta</li> <li>• Se debe vaciar el digestor para el mantenimiento de las paletas</li> </ul>
<b>Conveniencia</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todo tipo de sustratos en digestión húmeda</li> <li>• Apto para sustratos con alto contenido en materia seca (digestión seca)</li> <li>• Digestores verticales y horizontales</li> </ul>

### 3.3.7.2. Agitación neumática

El mezclado mediante agitación neumática consiste en inyectar parte del biogás generado en la digestión, previamente comprimido, por medio de boquillas situadas en la parte inferior del digestor. El gas asciende, en forma de burbujas, a través del sustrato, mezclándolo [62, 87]. El caudal recomendado de gas se sitúa entre 0,0045 y 0,007 m<sup>3</sup> de biogás por minuto y por m<sup>3</sup> del digestor [62].

No es un método muy habitual, salvo cuando se trata de sustratos muy fluidos con poca tendencia a generar costra. En estos casos resulta de interés su uso, debido a que la mayoría de los componentes del sistema de agitación se encuentran en el exterior del digestor, facilitando el mantenimiento o reparación y evitando problemáticas como la corrosión o la infiltración [62, 87].

Las características, ventajas e inconvenientes y conveniencia de la agitación neumática aparecen reflejadas en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Características y ventajas e inconvenientes de la agitación neumática. Adaptado de la bibliografía [62, 87].

<b>Agitación neumática</b>
<b>Características de operación</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intermitente</li> <li>• Potencia del compresor: desde 0,5 kW. Por ej.: compresor de 15 kW para reactor de 1.400 m<sup>3</sup></li> </ul>
<b>Ventajas e inconvenientes</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El sistema de agitación se encuentra casi totalmente en el exterior</li> <li>• Se evita la sedimentación</li> <li>• Se debe vaciar el digestor para el mantenimiento del sistema de inyección</li> <li>• Los compresores deben ser compatibles con la composición del biogás</li> <li>• Los compresores deben ser estancos para evitar la introducción de aire</li> </ul>
<b>Conveniencia</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sustratos muy fluidos con poca tendencia a formación de costra, en digestión húmeda</li> <li>• Digestores verticales y horizontales</li> </ul>

### 3.3.7.3. Agitación hidráulica

Consiste en el uso de bombas que extraen y retornan el sustrato, forzando su mezclado [62, 87]. Tiene la ventaja de que todos los elementos implicados (bombas, válvulas y tuberías) se encuentran en el exterior del digestor. Además, es apta para cualquier tamaño del mismo [93].

Los requisitos para una agitación hidráulica eficiente son [93]:

- La velocidad de impulsión del sustrato deberá estar comprendida entre 1,5 y 2,7 m/s.
- El caudal recirculado al día será como mínimo el volumen del digestor, siendo recomendable el doble.

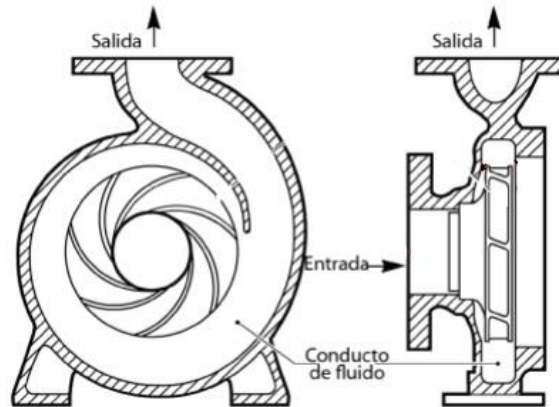
Hay que tener en cuenta que las bombas no trabajan ininterrumpidamente, sino de manera intermitente, por lo que el requisito del caudal habrá que ponderarlo al tiempo que estén en funcionamiento, con valores que suelen estar entre 6 y 10 h/día [93].

Los tipos de bombas más utilizadas en la producción de biogás son: centrífugas, lobulares rotatorias y de tornillo de rotor único excéntrico.

#### a) ***Bombas centrífugas***

Una bomba centrífuga tiene un impulsor que gira dentro y que, por efecto de la fuerza centrífuga, eleva la velocidad del fluido, que se convierte en presión a la salida de la bomba [87]. La Figura 26 muestra una simplificación de su funcionamiento.

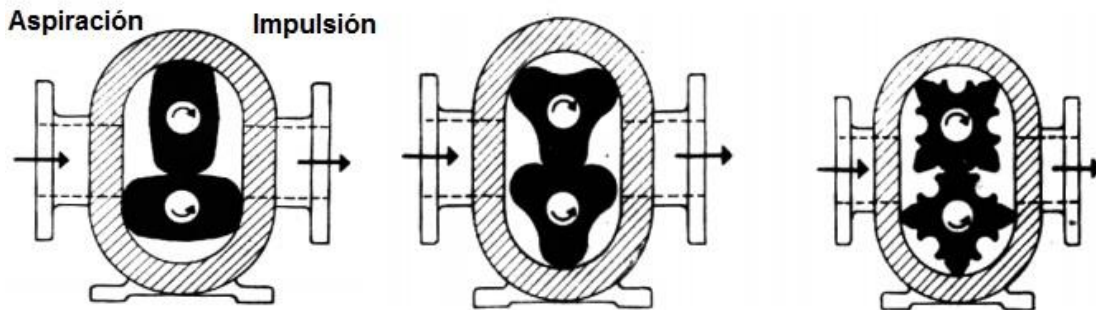




**Figura 26.** Bomba centrífuga [95].

**b) Bombas lobulares rotatorias**

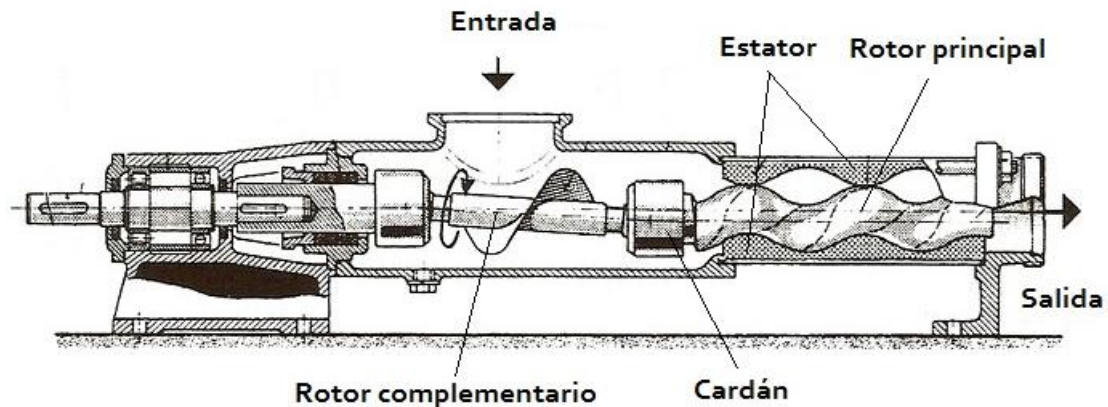
Las bombas lobulares rotatorias tienen dos pistones con dos a seis lóbulos en un cuerpo oval, algunas de las cuales se muestran en la Figura 27, que rotan en sentido opuesto. La bomba succiona el fluido para llenar los huecos entre los dientes de los pistones y lo impulsa incrementando la presión en la salida [87].



**Figura 27.** Bomba lobular rotatoria de 2 lóbulos (izq.), de 3 lóbulos (centro) y de 4 lóbulos (dcha.) [95].

**c) Bombas de tornillo de rotor único excéntrico**

Está compuesta por un rotor de acero inoxidable en forma de tornillo sinfín que gira excéntricamente dentro de una carcasa llamada estator fabricado de material elástico. La entrada del sustrato se realiza por un extremo del estator, en el cual, un rotor de tornillo sinfín complementario ayuda al sustrato a avanzar al rotor principal. Dicho rotor tiene dos movimientos, el giro propiamente dicho y un movimiento excéntrico, provocado por un cardán (una unión o rótula que une dos ejes no coaxiales), que le comunica presión al sustrato. Entre ambos movimientos obligan al fluido a avanzar [87, 96]. Todo ello se esquematiza en la Figura 28.



**Figura 28.** Bomba de tornillo de rotor único excéntrico [96].

Es una bomba con un flujo uniforme, una presión constante y el caudal es fácilmente ajustable mediante un variador de velocidad. Además, es capaz de trabajar con altas presiones, a largas distancias y para un amplio abanico de sustratos, especialmente, secos [87, 96].

En la Tabla 12, que se muestra a continuación, se clasifican las características básicas, las ventajas y desventajas, así como los usos más convenientes de cada uno de los tipos de bombas considerados anteriormente.

**Tabla 12.** Características y ventajas e inconvenientes de las bombas centrífugas, lobulares rotatorias y de tornillo de rotor único excéntrico. Adaptado de la bibliografía [62, 87].

Bomba centrífuga	Bomba lobular rotatoria	Bomba de tornillo de rotor único excéntrico
<b>Características de operación</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión hasta 20 bar</li> <li>• Caudal de 2 a 30 m<sup>3</sup>/min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión hasta 12 bar</li> <li>• Caudal de 0,1 a 16 m<sup>3</sup>/min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión hasta 48 bar</li> <li>• Caudal de 0,055 a 8 m<sup>3</sup>/min</li> </ul>
<b>Ventajas e inconvenientes</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño simple y compacto</li> <li>• Altos caudales</li> <li>• Existen modelos con función trituradora</li> <li>• Mantenimiento fácil</li> <li>• Debe colocarse por debajo del nivel del sustrato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño simple y compacto</li> <li>• Todos los modelos son reversibles</li> <li>• Mantenimiento fácil</li> <li>• Caudales bajos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño simple y compacto</li> <li>• Conveniente para medición</li> <li>• Algunos modelos son reversibles</li> <li>• Caudales bajos</li> <li>• Daños al trabajar en presencia de sólidos duros.</li> </ul>
<b>Conveniencia</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sustratos fluidos con menos del 8% de materia seca</li> <li>• No es adecuada para medición</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sustratos con alto contenido en materia seca</li> <li>• Adecuada para medición</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sustratos viscosos sin presencia de sólidos duros</li> <li>• Adecuada para medición</li> </ul>



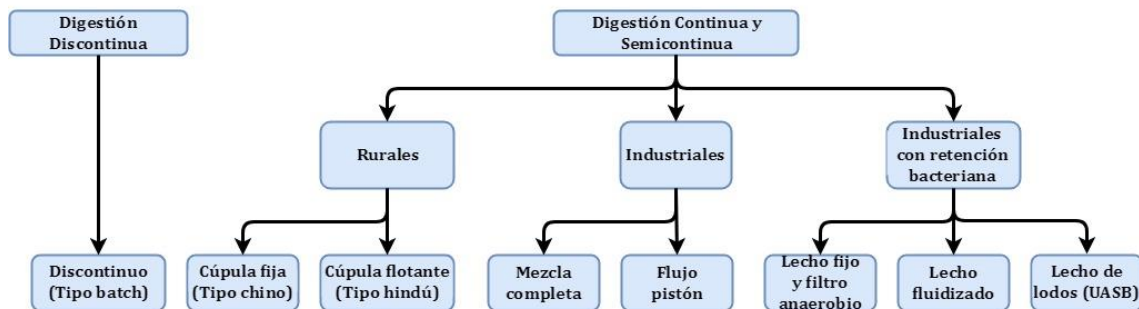
## 4. TIPOS DE DIGESTORES

En la actualidad existen, a nivel mundial, infinidad de tipos de reactores o digestores anaerobios, tanto en uso como siendo investigados a escala de laboratorio. Todos ellos tienen sus particularidades que los hacen diferentes unos a otros, aunque esencialmente todos se fundamentan en alguna de las tecnologías de digestión anaerobia que se describen en los siguientes apartados.

Es posible realizar una clasificación de las diferentes tecnologías en función de determinados aspectos [62, 87].

- Si está indicado para digestión húmeda o seca, según el contenido de humedad del sustrato (mayor o menor contenido de sólidos).
- Según el ámbito de aplicación: rural o industrial.
- Según el modo de operación: continuo o discontinuo.
- Dependiendo de si el proceso completo de digestión anaerobia se realiza en una sola etapa o en dos etapas.
- Según la temperatura de operación: psicrófilico, mesófilico o termófilico.

En este caso, se ha optado por realizar una clasificación según el modo de operación y, dentro de ésta, según el ámbito de aplicación, tal como se esquematiza en la Figura 29.

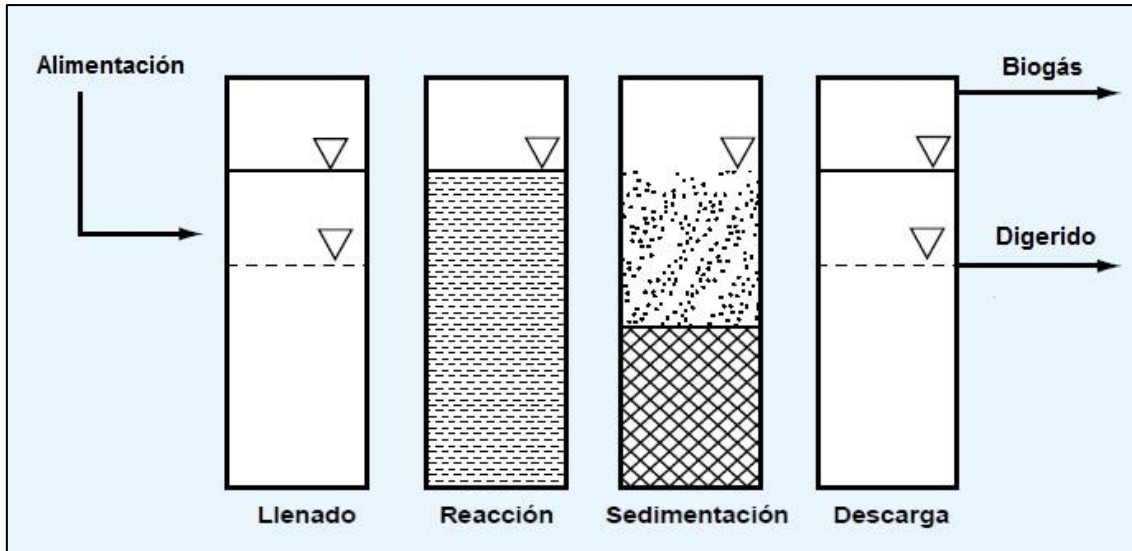


**Figura 29.** Clasificación de las tecnologías de digestión anaerobia. Elaboración propia.

### 4.1. DIGESTOR ANAEROBIO DISCONTINUO

Este tipo de reactores, también denominados batch, se caracterizan por su alimentación discontinua, es decir, realizan el proceso completamente con cada carga o lote antes de volver a ser alimentados (véase Figura 30) [62]. Es por ello que, habitualmente, se emplean con residuos que se producen con intermitencia. Generalmente, consisten en tanques herméticos con una salida de gas conectada a

un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás [99], y una apertura que permite la eliminación de los sólidos digeridos, tal como se muestra en la Figura 31.



**Figura 30.** Fases operacionales en un digester discontinuo [20].

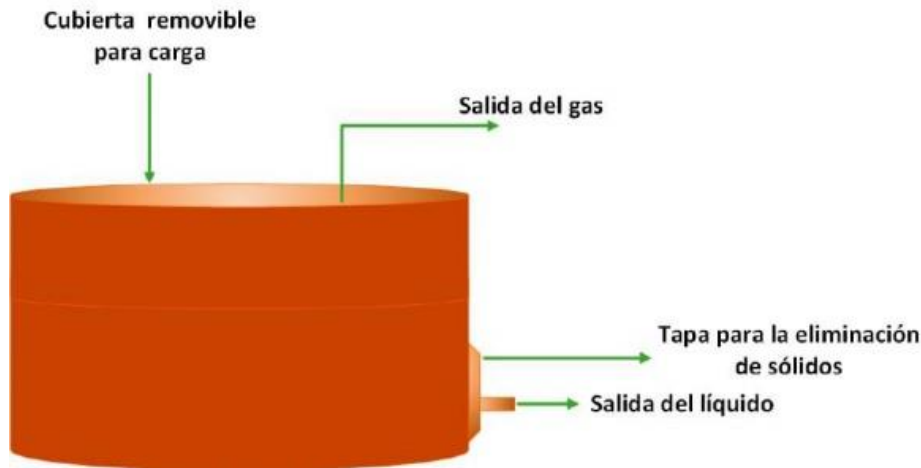
Este tipo de reactor presenta ciertas características particulares que lo hacen ventajoso frente a los sistemas convencionales continuos, dentro de las cuales destacan [20]:

- Son simples y requieren menos equipos que los continuos.
- Presenta una gran flexibilidad de operación, pudiendo adaptarse a la disponibilidad de los residuos.
- Puede emplearse para cualquier tipo de sustrato. Especialmente indicado para aquellos que presentan elevado contenido de sólidos y/o lignocelulósico.
- La operación puede llevarse a cabo sin recirculación de sólidos ni de líquido, salvo en aquellos casos en la que ésta se utilice como agitación.
- La etapa de sedimentación se realiza dentro del mismo reactor, por lo que no es necesario una unidad aparte.

Sin embargo, también presenta algunos inconvenientes [98]:

- Tiempos de digestión mayores, debido a que la fauna biológica debe renovarse en cada ciclo. Es por ello que, usualmente, se inocula el nuevo sustrato con material digerido en el proceso de digestión anterior.
- No están indicados para operar a gran escala, por el mayor empleo de recursos humanos en la carga y descarga, y los problemas de almacenamiento de los residuos.

- La generación de biogás no es constante, por lo que, para una producción de gas continuada y estable, se necesita operar con varios digestores en diferentes fases de la digestión anaerobia.



**Figura 31.** Digestor discontinuo [98].

## 4.2. DIGESTORES ANAEROBIOS CONTINUOS Y SEMICONTINUOS

Los digestores anaerobios que operan en modo continuo (cuando el sustrato se bombea sin interrupción) o semicontinuo (si se aporta en pequeños lotes una o varias veces al día) se pueden clasificar según su lugar de aplicación más común: en el medio rural o en zona industrial.

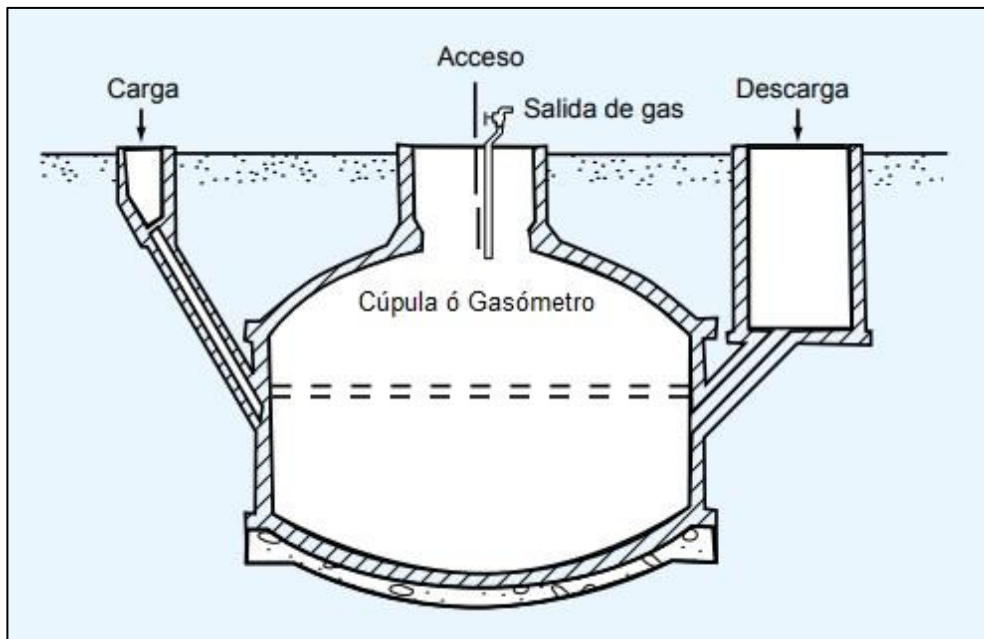
### 4.2.1. RURALES

Dentro de los digestores anaerobios de ámbito de aplicación rural, es decir, orientados a lugares de baja densidad de población donde las necesidades energéticas no están de todo bien cubiertas o existen limitaciones económicas para el acceso a ellas, se distinguen dos tipos, dependiendo de la movilidad de su cúpula o gasómetro: fija o flotante. Los primeros son también denominados de tipo chino, mientras que los segundos son llamados de tipo hindú. En los dos siguientes apartados se definen ambos tipos con más de detalle.

#### 4.2.1.1. Cúpula o gasómetro fijo (Tipo chino)

Este digestor anaerobio (véase Figura 32) se caracteriza por tener una forma cilíndrica y estar enterrado, lo que favorece el proceso de digestión evitando los cambios de temperatura, debido a que no está calefactado. El reactor se alimenta completamente con material inoculado con digeridos anteriores para acelerar el arranque y, diariamente, se añaden los residuos que se encuentren disponibles en

ese momento a través del tubo de carga que conecta con la zona media del reactor. A medida que el biogás se va generando, éste se almacena en la cúpula fija, dentro del mismo reactor, desde donde se capta y transporta mediante tuberías. El digerido se canaliza hasta la zona de descarga donde se va recolectando. Una o dos veces al año es necesario vaciar completamente el digestor y reiniciar el proceso [20].



**Figura 32.** Digestor de cúpula fija o tipo chino [20].

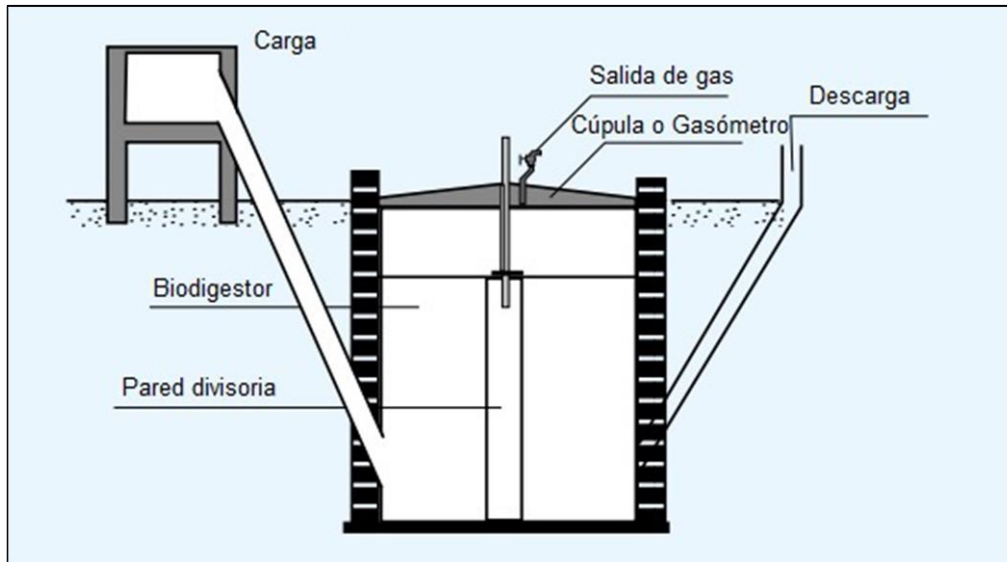
Este sistema ha sido bastante aplicado para tratar excretas humanas, bovinas y porcinas, a pequeña y mediana escala. Tiene bajo coste y una vida útil larga. Además, el diseño es básico por lo que no requiere de una inversión elevada. No obstante, la cúpula de gas requiere de una impermeabilización especial para evitar fugas y un conocimiento técnico adecuado para su construcción. Pese a ello, las fugas de gas se dan frecuentemente [99].

Aun cuando la generación de biogás es baja y los tiempos de retención son elevados, en el medio rural muchas veces resulta de interés, en pos de una alta generación de biofertilizantes.

#### **4.2.1.2. Cúpula o gasómetro flotante (Tipo hindú)**

Este tipo de digestores pueden considerarse como una evolución del digestor de cúpula fija y se muestra en la Figura 33. El componente principal de este sistema es una campana o cúpula de acero que tiene la característica de flotar en el biodigestor. A medida que el biogás que se genera y almacena, la cúpula sube manteniendo la presión constante dentro del reactor [99]. Ello permite una generación diaria relativamente uniforme de biogás, siempre y cuando se mantengan las condiciones

de operación adecuadas. La alimentación se realiza completamente al inicio de proceso y diariamente se carga con los residuos que se van produciendo. La mecánica de carga, además, provoca la agitación del sustrato [20]. Una o dos veces al año es necesario vaciar completamente el reactor y volver a iniciar el proceso.



**Figura 33.** Digestor de cúpula flotante o tipo hindú [20].

A diferencia de la campana flotante que se construye de acero, el resto de los componentes del sistema son construidos con materiales convencionales, en general, ladrillos y otros elementos habituales en construcción. Este digestor ha sido utilizado para tratar excretas de ganado bovino y porcino, y es fácil de operar. Por otro lado, la cúpula es relativamente costosa, requiere mucho mantenimiento y su uso es limitado a ciertos sustratos ya que tiende a quedar atascada cuando se emplean sustratos fibrosos [99].

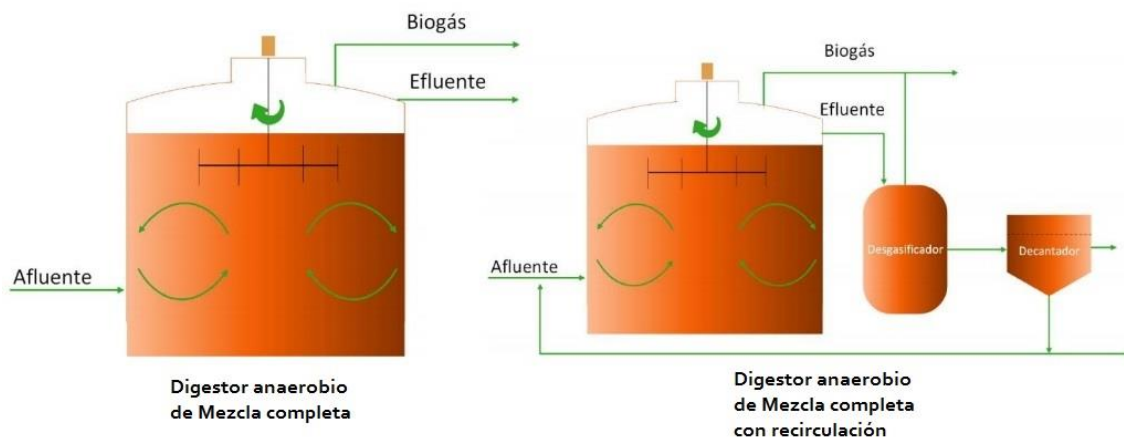
#### 4.2.2. INDUSTRIALES

Los digestores anaerobios de tipo industrial están pensados para procesar cantidades elevadas de materia orgánica residual procedente de la actividad industrial, agrícola, ganadera y municipal.

##### 4.2.2.1. Mezcla completa

En los digestores de mezcla completa, representados en la Figura 34, el sustrato y los microorganismos encargados de la digestión se distribuyen uniformemente dentro del reactor mediante un agitador mecánico o la reinyección a presión del biogás producido [98, 100]. Es, por tanto, un digestor similar al discontinuo, pero en este caso trabajando en modo continuo o, incluso, semicontinuo.

Son digestores simples y tienen, en general, un buen funcionamiento y unos costes de construcción y mantenimiento bajos. Sin embargo, la mecánica de operación de este tipo de digestores no permite una concentración alta de microorganismos y, por tanto, se necesitan tiempos de retención altos para conseguir una transformación suficiente de materia orgánica en biogás. Son adecuados para la digestión húmeda, es decir, para sustratos líquidos con bajo contenido en materia sólida (menor del 10-12%) [100], operando, en general, en régimen mesofílico o termofílico.



**Figura 34.** Digestores de Mezcla Completa y de Mezcla Completa con Recirculación [98].

Existe una evolución de este tipo de reactores, denominado de mezcla completa con recirculación, o de contacto anaerobio (véase Figura 34), en los cuales, el efluente o digerido pasa por una decantación en donde se retienen los microorganismos para reintroducirlos o recircularlos al interior del digestor [98]. Con este proceso adicional se consigue reducir el tiempo de retención debido a que la fauna bacteriana no es eliminada con el digerido, obteniéndose, así, concentraciones más altas.

La principal aplicación de los digestores anaerobios de mezcla completa, con o sin recirculación, está en el tratamiento de lodos procedentes de la depuración de aguas residuales [98, 100].

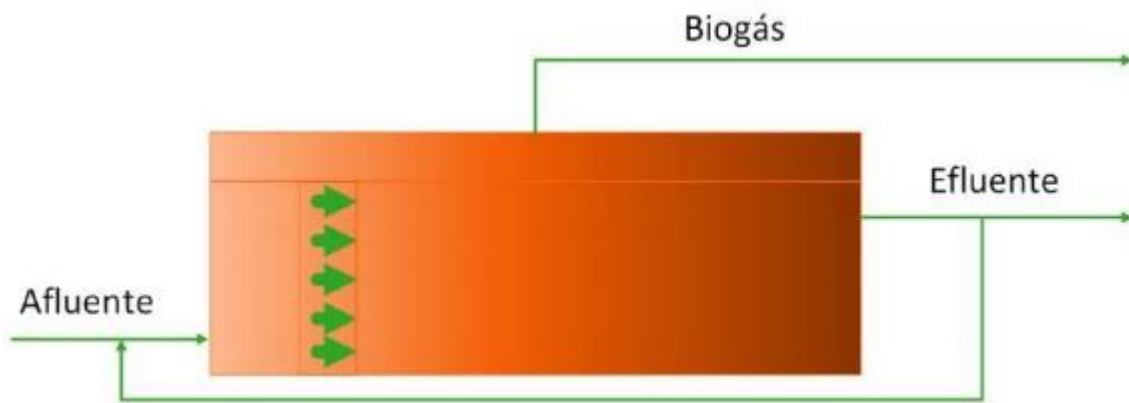
#### 4.2.2.2. Flujo pistón

A diferencia de los digestores de mezcla completa, los de flujo pistón son habitualmente utilizados para el tratamiento de residuos con una mayor concentración de sólidos, entre el 15 % y el 40 %. El reactor está dispuesto de forma horizontal, total o parcialmente enterrado, y de sección circular o cuadrada. Pueden

construirse de gran capacidad, llegando hasta los 1.000–1.500 m<sup>3</sup> [87, 98, 100] y operar en cualquier régimen: psicofílico, mesofílico o termofílico.

El sustrato fluye horizontalmente a través del digestor (véase Figura 35). Cuando la digestión es húmeda y el sustrato lo suficientemente fluido, la entrada de material fuerza a aquel ya digerido a la salida. En los casos en los que se trata sustrato más seco y menos fluido, el digestor cuenta con un sistema de agitación mecánico compuesto por agitadores de paletas que, además de impulsarlo, favorecen su mezclado [87].

La constante eliminación de los microorganismos con el digerido prácticamente obliga al recirculado parcial del mismo o al uso de materia orgánica con contenido bacteriano, tal es el caso de las excretas animales o humanas.



**Figura 35.** Digestor de flujo pistón [99].

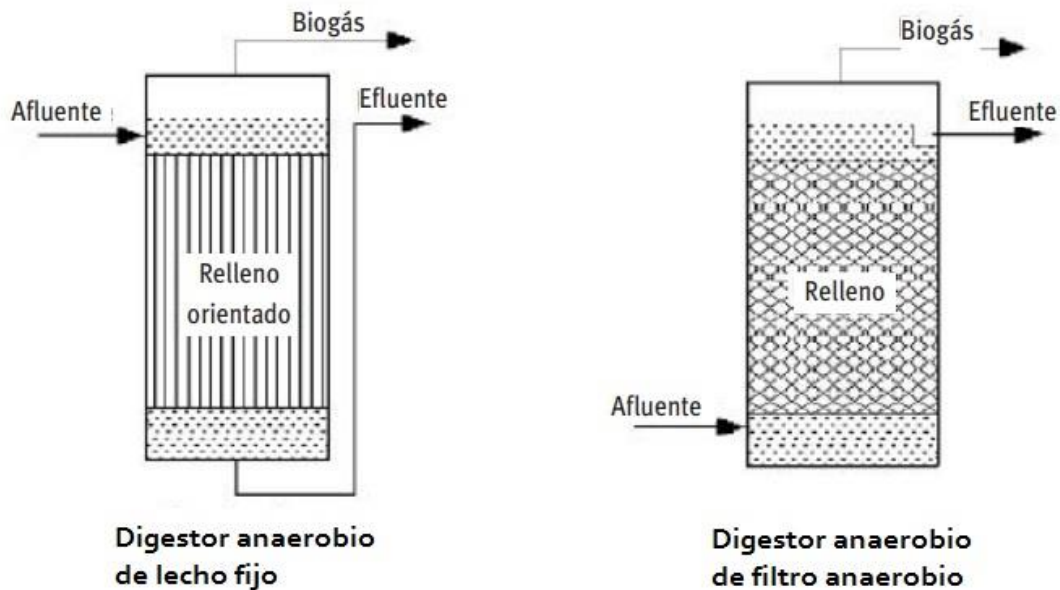
#### **4.2.3. INDUSTRIALES CON RETENCIÓN BACTERIANA**

Los digestores anaerobios industriales con retención bacteriana son una evolución de los industriales y que, a diferencia de éstos, permite la inmovilización de los microorganismos anaerobios dentro del digestor o su recuperación del efluente para ser reintroducidos. Al igual que los digestores industriales están enfocados al mismo ámbito.

##### **4.2.3.1. Lecho fijo y Filtro anaerobio**

En ambos sistemas, que se muestran en la Figura 36, las bacterias anaerobias se fijan a la superficie o se alojan en los intersticios de un soporte inerte, llamado columna de relleno, de material cerámico o plástico. La dirección del flujo del sustrato es vertical.





**Figura 36.** Digestor de lecho fijo y de filtro anaerobio [101].

En los digestores de lecho fijo este flujo es descendente y el soporte es un conjunto de láminas orientadas paralelamente a éste. En el caso de los digestores de filtro anaerobio el flujo es ascendente y el soporte es un relleno donde los intersticios albergan los microorganismos [20, 62, 99, 101, 102].

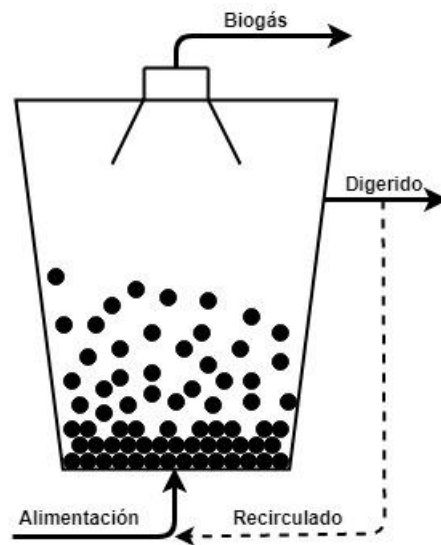
Tanto en un caso como en otro, estos microorganismos se fijan formando aglomeraciones y, cuando crecen excesivamente o mueren, se desprenden y son eliminados como lodos. Al no ser eliminados junto al digerido pueden permanecer largos períodos dentro del digestor, de hasta 100 días, logrando disminuir los tiempos de permanencia del sustrato dentro del reactor [103, 104]. Pueden funcionar en cualquier régimen de temperatura aunque es preferible trabajar en el rango mesofílico y termofílico [102].

Estos sistemas han sido extensamente aplicados para el tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria [62, 99, 102], con un bajo contenido en sólidos, debido a que una alta concentración de éstos interferiría en el correcto funcionamiento del digestor al acumularse en los intersticios del relleno y generar caminos preferenciales [20, 99, 102-104].

A pesar de que el coste de construcción es un limitante importante para su implantación, en especial el material de relleno, los gastos en su funcionamiento son bajos [99, 102].

#### 4.2.3.2. Lecho expandido y Lecho fluidizado

En ambos sistemas, representados en la Figura 37, al igual que en los digestores de lecho fijo y filtro anaerobio, los microorganismos se encuentran fijados a un soporte inerte para favorecer la permanencia de éstos dentro del reactor. La diferencia radica en el tamaño de este soporte, formado por partículas muy pequeñas de materiales tales como arena, alúmina, carbón activado o materiales plásticos, que permiten a las bacterias adheridas a ellas sostenerse libremente en el sustrato de alimentación por la fuerza de éste en su bombeo al interior del digestor [20, 99, 101].



**Figura 37.** Digestor de lecho expandido/fluidizado. Elaboración propia.

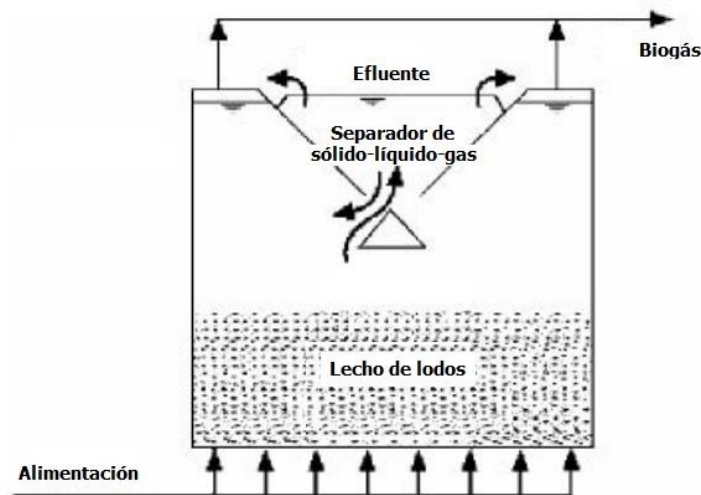
Cuando el lecho, formado por el material de soporte y los microorganismos, se expande o fluidiza entre el 10 y el 30% del mismo, se habla de digestores de lecho expandido, mientras que en aquellos casos en los que se sobrepasa el 30%, se denominan digestores de lecho fluidizado [20, 99, 101].

La fluidificación del soporte permite aumentar la superficie a la que pueden adherirse los microorganismos aumentando la población bacteriana encargada de la digestión anaerobia y, con ello, reduciendo los tiempos de digestión de la biomasa.

Sin embargo, debido a que parte del lecho estará “flotando” en el sustrato, éste debe ser lo suficientemente fluido para permitirlo, y es por ello que su aplicación es adecuada para materias orgánicas tales como, aguas residuales procedentes de la industria agroalimentaria y fracciones líquidas de residuos ganaderos, aunque, en este último caso, en menor medida [62, 99, 101].

#### 4.2.3.3. Lecho de lodos (UASB)

El sistema de digestión anaerobia de lecho de lodos (véase Figura 38), conocido también como U.A.S.B. (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket), se basa en proporcionar al sustrato las características fisicoquímicas más adecuadas para favorecer la floculación y coagulación de la población bacteriana sin necesidad de intervención de ningún tipo de soporte. La decantación de los flóculos, o agregados de microorganismos, puede realizarse mediante bacterias que provocan su granulación, o con la ayuda de precipitantes, como sulfuros o carbonatos. Esta acción forma un lecho de lodos en el fondo del reactor que digiere el sustrato en su ascenso a través de él. El movimiento del biogás desde el fondo hasta el lugar de recogida del mismo, en la parte superior, provoca, además, la agitación del sustrato [76, 99, 103].



**Figura 38.** Digestor de lecho de lodos (U.A.S.B.) [101].

La alimentación se produce verticalmente en flujo ascendente y, a diferencia de otros sistemas, a lo largo de toda la base del digestor. Todo ello permite al lecho de lodos expandirse y favorecer el ascenso del biogás. Es necesario disponer de separadores sólido-líquido-gas que eviten la salida de sólidos al exterior junto al digerido [76, 101-103]. Al igual que los anteriores sistemas con retención bacteriana, se consiguen tiempos de retención de los microorganismos muy elevados, reduciendo con ello el tiempo de digestión de la biomasa [76, 102].

Es una tecnología que, únicamente, es adecuada para el tratamiento de aguas residuales en las cuales su composición posibilite la formación de flóculos de bacterias lo suficientemente grandes, es decir, deben ser sustratos con buena sedimentación. A pesar de ello, es ampliamente utilizada en el tratamiento de residuos, en especial, aguas residuales procedentes de la industria agroalimentaria [76, 99, 101].

## 5. PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Los productos obtenidos inmediatamente después de la digestión anaerobia de la biomasa son el biogás, un fluido gaseoso, y el digerido, cuyo estado, líquido o una mezcla líquida y sólida, dependerá de las características del sustrato introducido en el digestor. Cuanto mayor sea el contenido en sólidos del sustrato a digerir, mayor será la densidad del digerido, tendiendo a ser un material viscoso liquido-sólido.

### 5.1. BIOGÁS

Tal como se puede deducir del nombre, el biogás se produce mediante un proceso biológico. Más estrictamente, un proceso bioquímico denominado digestión anaerobia o biometanización, el cual ya ha sido descrito en anteriormente [87].

La digestión anaerobia se produce de manera muy habitual en la naturaleza como, por ejemplo, en el fondo de lagos, en pozos de lodo líquido o en el rumen de los animales rumiantes. La materia orgánica se convierte casi enteramente en biogás gracias a la acción de diversos microorganismos [87].

#### 5.1.1. CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS

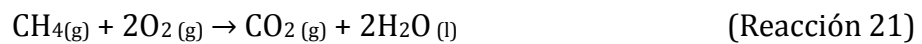
El biogás es una mezcla de gases compuesta principalmente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> y en menor proporción otros gases como H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O y compuestos orgánicos. El contenido de cada uno de estos gases en el biogás depende del sustrato y los parámetros de operación utilizados en la digestión anaerobia [62, 64, 102]. Si la digestión anaerobia se lleva a cabo de forma adecuada, dichos gases minoritarios no sobrepasan el 5 % en volumen de gas [20]. En general, los valores suelen comprender los mostrados en la Tabla 13 (medidos en porcentaje en volumen) dependiendo del origen de los residuos empleados.

**Tabla 13.** Composición del biogás después de la digestión anaerobia, en porcentaje en volumen [62, 64].

Compuesto	Residuos agrícolas	Residuos industriales	Lodos de depuradora	Vertedero
CH <sub>4</sub>	50 - 80 %	50 - 70 %	50 - 80 %	45 - 65 %
CO <sub>2</sub>	20 - 50 %	30 - 50 %	20 - 50 %	34 - 55 %
H <sub>2</sub>	0 - 2 %	0 - 2 %	0 - 5 %	0 - 1 %
N <sub>2</sub>	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 3 %	0 - 20 %
O <sub>2</sub>	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 5 %
CO	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 1 %	Trazas
H <sub>2</sub> S	Trazas	0 - 8 %	0 - 1 %	Trazas
NH <sub>3</sub>	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
H <sub>2</sub> O	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Siloxanos	-	0 - 0,02 %	0 - 0,02 %	0 - 0,02 %
Comp. Org.	Trazas	Trazas	Trazas	0,01 - 0,6 %

El poder calorífico del biogás depende casi exclusivamente del porcentaje de CH<sub>4</sub> contenido en él, aunque puede incrementarse si existen cantidades significativas de otros gases combustibles en su composición como H<sub>2</sub> o CO. El CO<sub>2</sub> es el segundo compuesto mayoritario del biogás y al estar completamente oxidado, no combustiona, por lo que posee un poder calorífico nulo. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede calcular, según la ecuación 2, el poder calorífico del CH<sub>4</sub>, a partir de la reacción de combustión del CH<sub>4</sub> (véase reacción 21) y las entalpías de formación de los reactivos y productos, mostradas en la Tabla 14. Se calcula el poder calorífico superior (PCS), es decir, considerando el calor cedido en la licuación del vapor de agua generado en la combustión.

$$PCS_{\text{masa}}^{\text{CH}_4} = - \frac{(\Delta H_{\text{fCO}_2(\text{g})}^0 + 2\Delta H_{\text{fH}_2\text{O}(\text{g})}^0) - (\Delta H_{\text{fCH}_4(\text{g})}^0 + 2\Delta H_{\text{fO}_2(\text{g})}^0)}{0,016 \text{ kg}_{\text{CH}_4} / \text{mol}_{\text{CH}_4}} \quad (\text{Ecuación 2})$$



**Tabla 14.** Entalpías de formación del CH<sub>4(g)</sub>, O<sub>2(g)</sub>, CO<sub>2(g)</sub> y H<sub>2O(l)</sub> en condiciones estándar (25°C y 1 atm) [105].

	CH <sub>4</sub> (g)	O <sub>2</sub> (g)	CO <sub>2</sub> (g)	H <sub>2O</sub> (l)
$\Delta H_{\text{f}}^0$ (kJ/mol)	-74,85	0	-393,52	-285,83

Sustituyendo los datos de las entalpías de formación en la ecuación 2 se obtiene la expresión:

$$PCS_{\text{masa}}^{\text{CH}_4} = - \frac{[-393,52 + 2 \cdot (-285,83)] - [-74,85 + 2 \cdot 0]}{0,016} = 55.645,63 \text{ KJ/Kg}$$

Sabiendo que la densidad del CH<sub>4</sub> en condiciones estándar (25°C y 1 atm) es 0,6604 kg/m<sup>3</sup>, se calcula el PCS del CH<sub>4</sub> en función del volumen, según la ecuación 3 [106].

$$PCS_{\text{vol}}^{\text{CH}_4} = PCS_{\text{masa}}^{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$PCS_{\text{vol}}^{\text{CH}_4} = \frac{55.645,625 \text{ kJ}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{0,6604 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} = 36.748,37 \text{ kJ/m}^3$$

Tal como se ha comentado anteriormente, el poder calorífico del biogás depende solamente del contenido de CH<sub>4</sub>, suponiendo su composición únicamente de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Se procede a calcular, según la ecuación 4, el PCS del biogás para un contenido mínimo de CH<sub>4</sub>, del 50%, y máximo, del 80%.

$$PCS_{\text{Biogás}} = \%_{\text{vol}}^{\text{CH}_4} \cdot PCS_{\text{vol}}^{\text{CH}_4} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$PCS_{\text{Biogás50}} = \frac{0,5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{1 \text{ m}^3 \text{ Biogás}} \cdot \frac{36.748,37 \text{ kJ}}{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4} = 18.374,19 \text{ kJ/m}^3 \text{ Biogás}$$

$$PCS_{\text{Biogás80}} = \frac{0,8 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{1 \text{ m}^3 \text{ Biogás}} \cdot \frac{36.748,37 \text{ kJ}}{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4} = 29.398,70 \text{ kJ/m}^3 \text{ Biogás}$$

En definitiva, el PCS del biogás estará comprendido entre los 18.374,19 kJ/m<sup>3</sup> y los 29.398,70 kJ/m<sup>3</sup> dependiendo de su contenido en CH<sub>4</sub>.

### 5.1.2. COMPUESTOS PROBLEMÁTICOS EN EL BIOGÁS

Se debe prestar atención a determinados compuestos que pueden estar presentes en el biogás producido y que pueden generar todo tipo de problemas.

En primer lugar, el alto contenido de CO<sub>2</sub> en el biogás conlleva inconvenientes relacionados con su nulo valor energético, el cual provoca el aumento de los gastos de transporte y almacenamiento, principalmente.

La presencia de compuestos de azufre (sulfuros, disulfuros y mercaptanos), y en especial la del H<sub>2</sub>S, provoca la corrosión de muchos metales que, además, se agrava con el aumento de la concentración, la presión, la temperatura o la presencia de agua. Es por ello que, si el biogás contiene cantidades significativas de azufre, en sus diferentes combinaciones, debe ser removido mediante procesos de desulfuración para evitar daños en compresores, motores, conducciones o depósitos de almacenamiento, entre otros. Por añadidura, se debe considerar la normativa relativa a las concentraciones máximas admisibles según el ámbito de aplicación del biogás [102].

De igual modo, la presencia de altas concentraciones de NH<sub>3</sub> genera problemas de corrosión en motores de combustión y produce óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), importantes contribuyentes de la contaminación ambiental, y cuya emisión está severamente limitada por la legislación [102].

Por otra parte, el biogás sale del digestor saturado de vapor de agua que, en las conducciones posteriores a temperatura ambiente, condensa y puede producir obstrucciones. Por esta razón es necesario que dichas conducciones dispongan de una pendiente adecuada y purgadores para permitir la evacuación de los condensados [102].

Los siloxanos son compuestos orgánicos formados por cadenas lineales o cíclicas de silicio, oxígeno y grupos metilo. Proviene de productos de consumo como champús, detergentes o cosméticos, por lo que pueden estar presentes en el biogás producido en vertederos o a partir de residuos urbanos y lodos de depuradoras [102, 107]. De igual modo ocurre con los compuestos orgánicos volátiles (COV) de los cuales los

más problemáticos son los halogenados, los cuales limitan su presencia, principalmente, al biogás de vertedero. En general, ambos son compuestos que no suelen presentarse en el ámbito agroindustrial y por tanto no revisten importancia para este proyecto [102, 107-109].

En las Tablas 15 y 16, que se muestran a continuación, se resumen los problemas derivados y los tratamientos habituales, respectivamente, para la remoción de los compuestos mencionados en los párrafos anteriores.

**Tabla 15.** Consecuencias de la presencia de compuestos en el biogás [109].

Compuesto	Consecuencias
CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nulo valor calorífico</li> <li>Aumento de los costes de almacenamiento y transporte debido al mayor volumen del biogás.</li> </ul>
H <sub>2</sub> S	<ul style="list-style-type: none"> <li>Corrosión en compresores, tanques y motores.</li> <li>Concentraciones muy altas son tóxicas.</li> <li>El SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>, generados en la combustión, son tóxicos y corrosivos en presencia de agua.</li> </ul>
Agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>Corrosión en compresores, tanques y motores al reaccionar con H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub> formando ácidos.</li> <li>Acumulación de agua en tuberías.</li> <li>Condensación y/o congelación debido a altas presiones.</li> </ul>
NH <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Corrosivo en presencia de agua. Tóxico. Legislación restrictiva para emisiones de NO<sub>x</sub>.</li> </ul>
Siloxanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>El SiO<sub>2</sub> formado en la combustión produce erosión y acumulaciones en motores.</li> </ul>
COV halogenados	<ul style="list-style-type: none"> <li>Corrosión en motores.</li> </ul>

**Tabla 16.** Tratamientos habituales para la remoción de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y H<sub>2</sub>O en el biogás [102, 109, 110].

Compuesto	Tratamientos	Comentarios
CO <sub>2</sub>	Absorción física con agua o disolventes orgánicos.	La mayor solubilidad en agua del CO <sub>2</sub> respecto al CH <sub>4</sub> permite su absorción. El CH <sub>4</sub> sale saturado por lo que hay que eliminar la humedad. Los disolventes orgánicos evitan la recirculación del N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> removido. Se opera a presiones entre 4-10 bar.
	Absorción química mediante disolución con aminas.	Las aminas tienen alta la reactividad del CO <sub>2</sub> permitiendo operar desde la presión atmosférica hasta 4 bar. Las aminas también presentan alta reactividad con el H <sub>2</sub> S por lo que debe ser removido antes.
	Adsorción a alta presión mediante carbón activado o zeolitas.	A altas presiones (hasta 10 bar) se favorece la adsorción del CO <sub>2</sub> . El carbón activado también adsorbe otros compuestos, pudiendo colmatar fácilmente. El H <sub>2</sub> S y la humedad deterioran irreversiblemente el material adsorbente por lo que deben ser removidos previamente. La humedad del biometano obtenido es muy baja.



**Tabla 16.** Tratamientos habituales para la remoción de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y H<sub>2</sub>O en el biogás (continuación) [102, 109, 110].

Compuesto	Tratamientos	Comentarios
CO <sub>2</sub>	Separación mediante membranas.	Se utilizan polímeros que son permeables para el CO <sub>2</sub> pero no para el CH <sub>4</sub> . Se utilizan varias membranas consecutivas para lograr una eliminación suficiente de CO <sub>2</sub> . Necesaria la remoción previa de H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> y agua. Elevadas presiones: entre 8 y 20 bares.
	Criogenia	La diferencia de los puntos de condensación del CH <sub>4</sub> (-161°C) y el CO <sub>2</sub> (-78,48°C) permite la eliminación del CO <sub>2</sub> en forma líquida. Gas energético para operar a altas presiones y bajas temperaturas. Para evitar la formación de hielo es necesario eliminar la humedad.
H <sub>2</sub> S	Reacciones de oxidación mediante microorganismos aerobios.	Producen azufre elemental y sulfatos. Puede realizarse en el interior del digestor con aire o mediante biofiltros o membranas. Coste de operación y mantenimiento bajos excepto con membranas. No se consigue una alta eliminación de H <sub>2</sub> S salvo con biofiltros o membranas. La sobreoxidación puede provocar explosiones.
	Adsorción mediante carbón activado, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> o Fe(OH) <sub>3</sub> o zeolitas.	El carbón activado también adsorbe otros compuestos, pudiendo colmatarse fácilmente. Se suele utilizar como tratamiento secundario, de afinado. Utilizando Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> o Fe(OH) <sub>3</sub> se consigue alta eliminación de azufre produciendo Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> y agua, que debe eliminarse. Las zeolitas tienen baja capacidad de adsorción por lo que se emplean junto con óxidos de cobre o zinc.
	Absorción con agua.	El agua arrastra el H <sub>2</sub> S que posteriormente se reacciona con NaOH, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , FeCl <sub>3</sub> o H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> para la oxidación del azufre y facilitar la recuperación. Bajos costes de operación y mantenimiento (en digestor). Baja eliminación de azufre.
Agua	Enterramiento e inclinación de la tubería junto a trampas de humedad.	Se logra bajar la temperatura del gas para condensar el vapor de agua. La inclinación conduce el agua hasta los purgadores.
	Unidad de refrigeración a media o alta presión.	Refrigerar el gas para condensar el vapor de agua y recogerlo.
	Adsorción mediante filtros de silica gel (SiO <sub>2</sub> ) o carbón activado.	El carbón activado también adsorbe otros compuestos, pudiendo colmatarse fácilmente. Polvo y aceites deben eliminarse previamente. Alta eliminación y bajo coste de operación, aunque mayor inversión.
	Absorción mediante glicol o trietilenglicol.	Es uno de los métodos más empleado. Alta eliminación, aunque no completa. Alto coste de inversión.

### 5.1.3. USOS DEL BIOGÁS

Los elementos, compuestos o partículas problemáticos vistos en el apartado anterior no siempre es necesario removerlos. Según el uso que se le vaya a dar al biogás se considerarán para su remoción aquellos que se prevea que vayan a causar efectos negativos (véase Tabla 17). Por esta razón, en los apartados siguientes se describen las aplicaciones más habituales del biogás.

**Tabla 17.** Necesidad de remoción de compuestos problemáticos del biogás. Adaptado de la bibliografía [98, 109].

Aplicación	H <sub>2</sub> S	Agua	NH <sub>3</sub>	Siloxanos	COV halog.	CO <sub>2</sub>
<b>Calderas</b>	Sí	Sí	Sí	No	No	No
<b>Motores</b>	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí/No
<b>Turbinas y microturbinas</b>	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No
<b>Inyección a la red de gas natural</b>	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
<b>Combustible para vehículos</b>	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

#### 5.1.3.1. Producción de calor

El sistema más sencillo para aprovechar la energía química almacenada en el biogás, y con menores requisitos de calidad, es su combustión en caldera, tanto para producción de agua caliente, sanitaria o de calefacción, como vapor. Se trata del método más empleado en las plantas de digestión anaerobia para la calefacción de los reactores debido a que el combustible se genera en la misma planta [102].

El biogás se debe inyectar a una presión entre 8 y 25 mbar y se recomienda reducir el contenido en H<sub>2</sub>S por debajo de los 1.000 mg/m<sup>3</sup> para evitar problemas de corrosión por la generación de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en los gases de escape. Asimismo, conviene utilizar intercambiadores de calor y chimeneas de acero inoxidable o hierro fundido [87, 102, 110].

El vapor de agua puede provocar corrosión en las boquillas de inyección del biogás por lo que se recomienda su eliminación en un proceso que, además, reduce el contenido de H<sub>2</sub>S [102].

#### 5.1.3.2. Producción de electricidad y cogeneración

La producción de energía eléctrica se realiza comúnmente mediante una combinación de un motor de combustión de tipo Otto (gasolina como combustible y encendido provocado) o tipo Diesel (gasóleo como combustible y encendido por compresión), previamente adaptado a las características del biogás, y un alternador.

Estos sistemas presentan potencias eléctricas desde 30 hasta 3.000 kW y un rendimiento, que aumenta con la potencia, entre el 30 y 40%. La presión del biogás debe estar alrededor de 20 mbar [86, 101, 111].

Por otra parte, existe la opción de generar energía eléctrica mediante turbinas o microturbinas de gas. Las primeras están indicadas para instalaciones con potencias elevadas, a partir de 5 MW, mientras que las segundas pueden emplearse en otras instalaciones más reducidas y potencias entre 30 y 500 kW [102, 111, 112].

Las microturbinas tienen las ventajas de que pueden agruparse, permitiendo una gran modulación de la potencia instalada y, además, funcionar con biogás con bajo contenido en CH<sub>4</sub>, desde un 30-35%, y una presión entre 3 y 5 bar. Como desventaja, su eficiencia eléctrica es baja, entre un 15% y un 30%, por lo que están indicadas, sobre todo, cuando hay un mayor interés en la recuperación térmica que en la generación eléctrica [87, 102, 110]. En estos casos, se pueden alcanzar rendimientos de hasta un 83% [112].

En la Tabla 18 se muestran las especificaciones de calidad del biogás para motores de combustión y microturbinas, que varían según el fabricante.

**Tabla 18.** Concentraciones admisibles de compuestos problemáticos en el biogás para su uso en motores y microturbinas [102, 109, 110].

Parámetro	Motores	Microturbinas
<b>Presión del gas</b>	20 mbar	3,44 – 5,17 bar
<b>Humedad (T<sup>a</sup><sub>rocío</sub>)</b>	< T <sup>a</sup> <sub>gas</sub> – 6,7°C	< T <sup>a</sup> <sub>gas</sub> – 6,7°C
<b>H<sub>2</sub>S (respecto al CH<sub>4</sub>)</b>	542 – 1.742 ppm <sub>v</sub>	25 – 450 ppm <sub>v</sub>
<b>Siloxanos (respecto al CH<sub>4</sub>)</b>	5 – 28 mg/m <sup>3</sup>	< 0,03 mg/m <sup>3</sup>
<b>COV halogenados (respecto al CH<sub>4</sub>)</b>	60 – 491 ppm <sub>v</sub> *	200 ppm <sub>v</sub> *

\*como cloro equivalente: F=2Cl; Br=0,5Cl; I=0,25Cl [113].

Para lograr un mayor aprovechamiento energético, ambas tecnologías se utilizan generalmente acompañadas de un sistema de recuperación la energía térmica de los gases de escape y los fluidos de refrigeración mediante intercambiadores de calor [87, 102]. La generación de energía eléctrica y térmica conjunta recibe el nombre de cogeneración y es posible alcanzar rendimientos energéticos de hasta un 90% en sistemas con motor de combustión [102].

### 5.1.3.3. Inyección a la red de gas natural

La inyección del biogás a la red de gas natural supone una alternativa muy interesante, debido a que ofrece una gran capacidad de distribución y almacenaje [102]. Esto permite, por una parte, disminuir la problemática de su almacenamiento evitando utilizar grandes espacios en los lugares de producción para inmovilizar el biogás hasta su venta o utilización y, por otro lado, trasladarlo de la manera más eficaz hasta los puntos de consumo, donde la energía contenida en el biogás puede

aprovecharse más eficientemente, dado que la mayor parte de las plantas productoras de biogás que generan energía eléctrica apenas consumen una mínima parte del calor excedente al estar localizadas en entornos rurales donde las necesidades térmicas son menores [111].

No obstante, el biogás no puede ser inyectado a la red de gas natural sin un tratamiento previo de adecuación, tras el cual pasa a denominarse biometano o gas natural sustituto (GNS). Debe ser removido, en especial, el CO<sub>2</sub>, para alcanzar la concentración mínima de CH<sub>4</sub> requerida por la red en la que se introduzca. En consecuencia, el poder calorífico y el índice de Wobbe deben aumentar hasta alcanzar las especificaciones de dicha red. En ocasiones se añaden pequeñas cantidades de propano o butano, con mayor poder calorífico que el CH<sub>4</sub>, con este objetivo [101, 111].

Cabe recordar, como último requisito previo a la introducción del biometano a la red de gas natural, la adición de un producto, habitualmente tetrahidrotiofeno (THT), que le confiera al gas su olor característico para facilitar la detección de posibles fugas [111].

En la Tabla 19 se especifican los requisitos de calidad del biogás para su inyección en las redes de gas natural de algunos países de Europa.

**Tabla 19.** Especificaciones para cualquier gas introducido en las redes de gas natural de algunos países europeos [102, 109-111].

Parámetro	Unid.	Alemania	Austria	España	Francia	Países Bajos	Suecia	Suiza
PCS	MJ/m <sup>3</sup> N	30,2 - 47,2	38,5 - 48,1	36,94 - 47,74	34,2 - 37,8 <sup>(1)</sup> 38,5 - 46,1 <sup>(2)</sup>	31,6 - 38,7	-	38,5 - 47,2
W <sub>s</sub> <sup>(3)</sup>	MJ/m <sup>3</sup> N	37,8 - 46,8 <sup>(1)</sup> 46,1 - 56,5 <sup>(2)</sup>	47,9 - 56,5	48,25 - 57,81	42,5 - 46,8 <sup>(1)</sup> 48,2 - 56,5 <sup>(2)</sup>	43,6 - 44,4	44,7 - 46,4 <sup>(4)</sup> 43,9 - 47,3 <sup>(5)</sup>	47,9 - 56,5
ρ <sub>relativa</sub> <sup>(6)</sup>	-	0,55 - 0,75	0,55 - 0,65	0,555 - 0,7	0,555 - 0,7	-	-	-
Humedad (T <sup>a</sup> <sub>rocío</sub> )	°C	< T <sup>a</sup> <sub>suelo</sub> <sup>(7)</sup>	< -8 (a 80 bar)	< 2 (a 70 bar)	< -5 <sup>(7)</sup>	< -10 (a 8 bar)	< T <sub>amb</sub> - 5 < -9 (a 200 bar)	< -8 <sup>(7)</sup>
CH <sub>4</sub>	% vol.	-	> 96	> 95	-	> 80	97±1 <sup>(4)</sup> 97±2 <sup>(5)</sup>	> 96
CO <sub>2</sub>	% vol.	< 6	< 2	< 2,5	< 2,5	< 6	< 3	< 6
CO	% vol.	-	-	< 2	< 2	< 1	-	< 0,5
O <sub>2</sub>	% vol.	< 3	-	< 0,3	< 0,01	< 0,01	< 1	< 0,5
N <sub>2</sub>	% vol.	-	< 5	< 7,5	-	-	-	-
H <sub>2</sub> S	mg/m <sup>3</sup> N	< 5	< 5	< 15 <sup>(8)</sup>	< 5 <sup>(8)</sup>	< 5	< 15,2	< 5
NH <sub>3</sub>	mg/m <sup>3</sup> N	< 20	Sin límite	< 3	< 3	< 3	< 20	< 20
Siloxanos	mg/m <sup>3</sup> N	-	< 10	< 10	-	< 5	-	-
COV <sub>halog.</sub>	ppm <sub>v</sub>	< 1	0	-	-	-	< 1 (de Cl) < 10 (de F)	< 1

(1) Para la red de gas natural L (de bajo poder calorífico).

(2) Para la red de gas natural H (de alto poder calorífico).

(3) Índice de Wobbe superior a excepción de Suecia que usa el índice de Wobbe inferior.

(4) Especificación para gas natural combustible de vehículos con motor sin control lambda.

(5) Especificación para gas natural combustible de vehículos con motor con control lambda.

(6) Densidad del gas respecto a la densidad del aire.

(7) A la presión máxima de operación de la red de gas natural.

(8) Contenido máximo entre H<sub>2</sub>S y sulfuro de carbonilo (COS).

La eliminación de CO<sub>2</sub> puede resultar suficiente para adecuar el biogás a los requisitos para su inyección a la red de gas natural y puede ser interesante para muchas instalaciones, tanto grandes como pequeñas, debido a que no supone inversiones desmesuradas. Sin embargo, habitualmente no suele ser así y es necesario someter al biogás a procesos adicionales que hagan que no sea rentable. Es por ello que la conversión de biogás en GNS, generalmente, solo está indicada para grandes instalaciones que produzcan volúmenes muy elevados de biogás y que no sean capaces de consumir in situ.

#### 5.1.3.4. Combustible para vehículos

El uso del gas natural como combustible vehicular ha experimentado un rápido crecimiento durante las dos primeras décadas del siglo XXI, debido a que su combustión emite menores cantidades de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, azufre y partículas que otros combustibles [62].

Como alternativa de origen biomásica, es posible emplear biogás en sustitución del gas natural. Para ello, es necesario purificarlo para otorgarle una calidad similar a la del gas natural, de un modo similar a como sucede cuando el destino es su inyección en redes de gas. Esto supone, especialmente, remover el CO<sub>2</sub>, el H<sub>2</sub>S y otros compuestos sulfurados y el vapor de agua [62, 87].

En la Tabla 20 se listan las ventajas y los inconvenientes de la utilización del gas natural y el biometano como combustible de vehículos.

**Tabla 20.** Ventajas e inconvenientes del uso como combustible vehicular de GNC/BMC y GNL/BML [20, 62, 87, 98, 102, 110].

Gas Natural Comprimido (GNC) o Biometano Comprimido (BMC)	
Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menores emisiones de CO<sub>2</sub>, compuestos sulfurados y nitrogenados y partículas.</li> <li>• Origen biomásico en el caso del BMC.</li> <li>• Aceptable autonomía.</li> <li>• Bajo precio.</li> <li>• Consideración de ecológico según normativa. Baja carga impositiva.</li> <li>• Motores más duraderos y de menor ruido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesidad de purificación en el caso de BMC.</li> <li>• Gasto de energía en su compresión.</li> <li>• Inadecuada red de abastecimiento.</li> <li>• Se necesita adecuar los motores.</li> </ul>
Gas Natural Licuado (GNL) o Biometano Licuado (BML)	
Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menores emisiones de CO<sub>2</sub>, compuestos sulfurados y nitrogenados y partículas.</li> <li>• Origen biomásico en caso del BML.</li> <li>• Gran autonomía.</li> <li>• Bajo precio.</li> <li>• Consideración de ecológico según normativa. Baja carga impositiva.</li> <li>• Motores más duraderos y de menor ruido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasto energético grande en su transporte y almacenamiento: compresión y enfriamiento.</li> <li>• Inadecuada red de abastecimiento.</li> <li>• Se necesita adecuar los motores.</li> </ul>

Debido al considerable volumen del CH<sub>4</sub> en condiciones normales y a que posee un poder calorífico menor al de la gasolina o el gasóleo, la autonomía del vehículo que lo utilizara apenas sería de unos pocos km. Por esta razón, el gas se almacena comprimido o licuado para lograr un mayor contenido en un menor volumen [87, 98, 110].

### 5.1.3.5. Pilas de combustible

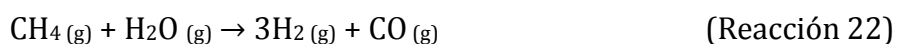
Las pilas, o celdas, de combustible se posicionan como una de las opciones más interesantes en la movilidad del futuro, más aún cuando las directrices europeas de los últimos años están fomentando una transición a marchas forzadas hacia los vehículos eléctricos.

Las pilas de combustible producen energía eléctrica en corriente continua a partir de una reacción electrolítica entre hidrógeno y el oxígeno proveniente del aire, dando como único producto vapor de agua, lo que supone la generación de energía sin la intervención de carbono, evitando la emisión de CO<sub>2</sub>. Otra de las principales ventajas viene dada por una generación de energía eléctrica directa, sin procesos intermedios, es decir, la energía química contenida en el combustible no tiene que ser convertida en energía térmica o mecánica previamente para producir electricidad [62, 110].

#### a) Producción de H<sub>2</sub>

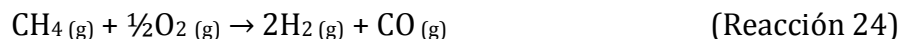
A partir del biogás, es posible producir H<sub>2</sub> para pilas de combustible, usualmente, mediante tres procesos: el reformado con vapor de agua, la oxidación parcial y el reformado en seco [62, 114]. Hay que tener en cuenta que el uso del biogás como reactivo, en detrimento del gas natural, habitualmente el más utilizado para este propósito, generará cantidades menores de H<sub>2</sub> debido a su menor contenido en CH<sub>4</sub> [115].

El reformado con vapor de agua es el método más utilizado para la producción de H<sub>2</sub> y es un proceso fuertemente endotérmico, que requiere temperaturas de entre 800 y 900°C. En contraposición a la alta demanda térmica, presenta conversiones CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> muy elevadas. Las Reacciones 22 y 23 son las reacciones químicas principales que ocurren en el reformado con vapor de agua [114-116].

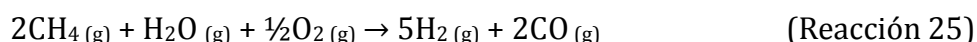


La oxidación parcial consiste en la combustión incompleta del CH<sub>4</sub>, según la reacción 24, y es un proceso exotérmico [116]. Dicha oxidación se consigue mediante una cantidad de O<sub>2</sub> por debajo de la relación estequiométrica, es decir, en defecto, para formar H<sub>2</sub> y CO [115]. Al igual que en el reformado con vapor de agua, el CO se suele

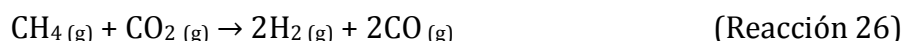
hacer reaccionar, según la reacción 23, anteriormente citada, para obtener una mayor cantidad de H<sub>2</sub>, además de CO<sub>2</sub>, e incrementar la conversión CH<sub>4</sub> a H<sub>2</sub> [116].



La combinación de ambos procesos para conseguir un sistema térmicamente neutro se denomina reformado autotérmico y se puede resumir según la reacción 25. De esta manera, se consigue evitar la necesidad del aporte externo de calor al sistema [115, 116].



El último proceso para la obtención de H<sub>2</sub> a partir del biogás es el reformado en seco, donde se hace reaccionar CH<sub>4</sub> con CO<sub>2</sub> para producir H<sub>2</sub> y CO (véase reacción 26) [114-116].



Este método resulta de especial interés, debido a que los reactivos son los componentes mayoritarios del biogás y se consigue, adicionalmente, la disminución del CO<sub>2</sub> y su problemática asociada. Por el contrario, es un proceso lento y que necesita de un catalizador, habitualmente compuestos de níquel, para acelerar la reacción [114].

### **b) Funcionamiento y tipo de pilas de combustible**

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que, en presencia de un catalizador, transforman la energía química del H<sub>2</sub> en electricidad y agua, según la reacción 27, sin recurrir a componentes móviles y, prácticamente, sin emisión de contaminantes [62, 110, 117, 118].



Una pila de combustible está formada por varias células electroquímicas conectadas en serie, con el fin de suministrar el voltaje necesario, dado que cada una de éstas presenta voltajes en torno a 1 voltio (V). Dentro de ellas se produce una reacción de oxidación-reducción, por lo que constan de un ánodo, donde se lleva a cabo la oxidación, un cátodo en el que se da la reducción, y un electrolito que facilita el paso de los iones. El material de este último componente, generalmente, da nombre al tipo de pila [119].

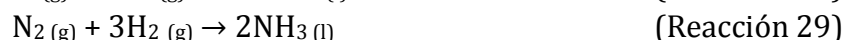
#### **5.1.3.6. Síntesis de derivados químicos**

El gas de síntesis, CO y H<sub>2</sub>, obtenido a partir del biogás mediante los procesos de producción de H<sub>2</sub> descritos en el apartado anterior, así como el CO<sub>2</sub> eliminado en la

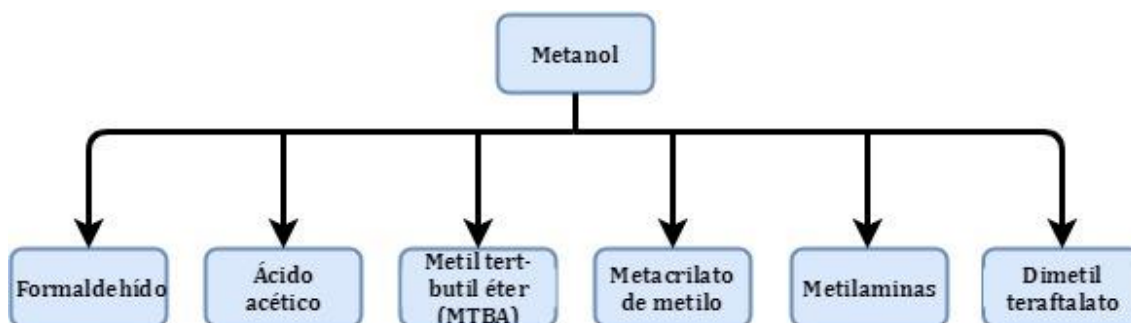


conversión del mismo en biometano, se puede emplear para otros propósitos distintos a su aprovechamiento energético.

El gas de síntesis se utiliza en la industria petroquímica para producir, mayoritariamente, metanol y amoníaco, ya sean como productos finales o como intermediarios en la síntesis de otros [120]. A continuación, se muestran las reacciones 28 y 29 mediante las cuales se obtiene metanol y amoníaco, respectivamente [120, 121].

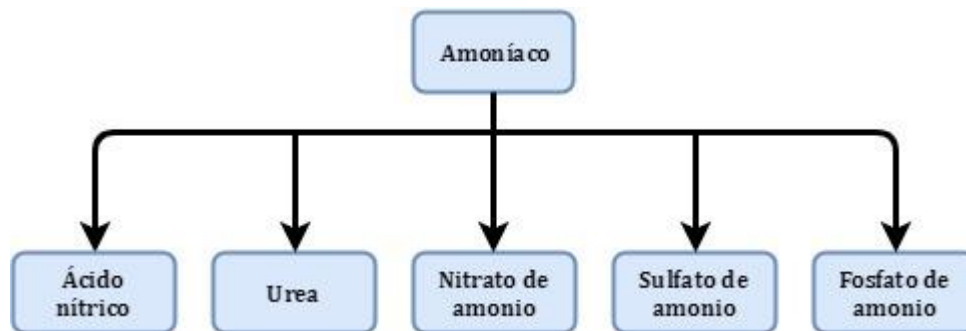


La aplicación directa del metanol se sitúa, prácticamente, en su uso como combustible o como aditivo en el etanol para evitar su ingesta, debido a su toxicidad, o en gasolinas cuando su procedencia es biomásica. En cuanto a los derivados químicos del metanol, el más frecuente es el metil tert-butil éter (MTBE), que se emplea como aditivo en las gasolinas para aumentar su número de octano, mejorando la combustión. La Figura 39 muestra los principales derivados químicos a partir del metanol. Además, también es utilizado en la fabricación de una amplia gama de productos como enchapados, tableros aglomerados, espumas, resinas, plásticos e, incluso, ropa y papel [121, 123].



**Figura 39.** Derivados químicos del metanol [120, 121, 123].

Tanto el amoníaco como sus compuestos químicos derivados (véase Figura 40), se utilizan, generalmente, para la producción de fertilizantes, debido a su contenido en nitrógeno. El amoníaco, también es empleado como inhibidor de la corrosión, en limpiadores domésticos o como refrigerante. En la fabricación de explosivos, el ácido nítrico es fundamental en los procesos de obtención de trinitrotolueno (TNT), nitroglicerina y nitrocelulosa. Otros usos para el amoníaco y sus derivados están en la industria alimentaria, metalúrgica, textil o farmacéutica, entre otros [122, 124].



**Figura 40.** Derivados químicos del amoníaco [120, 122, 124].

En cuanto al CO<sub>2</sub>, éste puede ser utilizado en un amplio abanico de ámbitos. Interviene en la síntesis del ácido salicílico, uno de precursores de la aspirina, en la industria alimentaria como aditivo o como conservante en, por ejemplo, la cerveza y la leche, respectivamente, en la fabricación de cemento, en la extinción de incendios, etc.

## 5.2. DIGERIDO

El digerido es el otro producto resultante de la digestión anaerobia y se produce en un volumen similar al del material introducido como sustrato de alimentación. Se trata de un material líquido o líquido-sólido, en función del tipo de digestión, que contiene la fracción orgánica que no ha podido degradarse, así como el conjunto de microorganismos, tanto vivos como muertos, involucrados en el proceso. Además, contiene la mayor parte de los elementos minerales que resultan de gran utilidad en las aplicaciones posteriores del mismo [62, 125].

En vista de la legislación, el digerido está considerado como un residuo dentro del grupo 19 de la lista europea de residuos (LER): “Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para el consumo humano y de agua para uso industrial”, y más concretamente, le corresponde el código 1906 referente a “Residuos del tratamiento anaeróbico de residuos” [62, 64, 125, 126].

El ámbito de aplicación del digerido está localizado, casi exclusivamente, en la agricultura como fertilizante. Por una parte, los cultivos se benefician del aporte de nutrientes y, por la otra, la materia orgánica supone una mejora de los suelos. Sin embargo, no constituye la única opción para la valorización del digerido. Existen alternativas menos comunes, como su utilización en la restauración de taludes o su transformación en biocoque, un material sólido compuesto básicamente por átomos de carbono, que puede emplearse como material adsorbente para el tratamiento de emisiones gaseosas y efluentes líquidos [64, 125].

### 5.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL DIGERIDO

La composición y características del digerido varían significativamente dependiendo del sustrato de alimentación empleado en la digestión anaerobia y de los parámetros de operación en los que se lleve a cabo el proceso [62, 64, 125].

En general, los digeridos presentan una relación C/N bajas, debido al consumo de carbono en la formación del biogás, y un pH ligeramente alcalino [125]. La digestión anaerobia húmeda produce efluentes líquidos, mientras que en la digestión anaerobia seca se obtienen efluentes semisólidos. Hay que tener en cuenta que durante el proceso se origina una pérdida de sólidos volátiles, que son los que forman el biogás, por lo que aumentará el porcentaje de humedad del digerido respecto al del sustrato de alimentación [62].

Desde el punto de vista agrónomo, el potencial fertilizante del digerido dependerá del contenido de nutrientes y materia orgánica, así como de su estabilidad microbiana [125].

En cuanto al primer aspecto, el nitrógeno se postula como el nutriente con el valor fertilizante más importante, en su forma inorgánica, aunque también son destacables los contenidos en fósforo y potasio. El aporte de éstos favorece el crecimiento de los cultivos, mientras que la materia orgánica, en cambio, es beneficiosa como enmienda para el suelo [126]. Por otra parte, respecto a la estabilidad microbiana, una alta actividad de microorganismos, una vez adicionado el digerido al suelo, puede provocar un gran desprendimiento de CO<sub>2</sub> y fenómenos de inmovilización de nutrientes por parte de dichos microorganismos, especialmente nitrógeno, debido a que son utilizados en su metabolismo. De esta forma se genera una competencia por los nutrientes entre los cultivos y los microorganismos del suelo, que reduce la eficacia fertilizante [62, 125, 126].

En la Tabla 21 se muestran las características fisicoquímicas de algunos digeridos obtenidos mediante digestión anaerobia húmeda y digestión anaerobia seca en función del origen del sustrato de alimentación empleado.

**Tabla 21.** Características de algunos digeridos encontrados en la bibliografía [62, 125-128].

Parámetro	Unid.	Digestión anaerobia húmeda				Digestión anaerobia seca	
		Diversos sustratos	FORM	Purín de cerdo	Purín de vaca	Diversos sustratos	Residuos agrícolas
<b>Humedad</b>	% peso	95,2	85,8	97,0	92,6	75,6	70,4
<b>pH</b>	-	8,1	8,2	8,0	8,0	8,3	-
<b>M.O.</b>	% peso	60,7	44,8	-	-	47,6	-
<b>C/N</b>	-	3,7	10,2	-	-	11,9	18,2
<b>Carbono</b>	g/kg	-	-	-	-	258,1	31,0

**Tabla 21.** Características de algunos digeridos encontrados en la bibliografía (continuación) [62, 125-128].

Parámetro	Unid.	Digestión anaerobia húmeda				Digestión anaerobia seca	
		Diversos sustratos	FORM	Purín de cerdo	Purín de vaca	Diversos sustratos	Residuos agrícolas
<b>Nitrógeno</b>	g/kg	6,1	3,0	4,0	3,9	32,7	16,9
<b>N-NH<sub>4</sub></b>	g/kg	-	1,6	3,0	1,5	-	-
<b>Azufre</b>	g/kg	-	-	-	-	2,5	-
<b>Fósforo</b>	g/kg	1,7 <sup>(1)</sup>	1,8 <sup>(1)</sup>	2,0 <sup>(1)</sup>	1,4 <sup>(1)</sup>	-	6,7
<b>Potasio (K<sup>+</sup>)</b>	g/kg	2,1 <sup>(2)</sup>	4,5 <sup>(2)</sup>	-	5,1 <sup>(2)</sup>	-	-
<b>Calcio (Ca<sup>2+</sup>)</b>	g/kg	-	7,3 <sup>(3)</sup>	-	-	-	-
<b>Magnesio (Mg<sup>2+</sup>)</b>	g/kg	0,2 <sup>(4)</sup>	2,3 <sup>(4)</sup>	-	-	-	-

(1) Como pentaóxido de difósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

(2) Como monóxido de dipotasio (K<sub>2</sub>O)

(3) Como monóxido de calcio (CaO)

(4) Como monóxido de magnesio (MgO)

Tal como se ha comentado anteriormente, los digeridos son materiales con potencial como fertilizante agrícola o enmienda orgánica de suelos. Sin embargo, no se puede establecer esta afirmación de forma universal pues algunas características de los sustratos de partida para la digestión anaerobia pueden limitar o incluso excluir el digerido para este uso. Por ejemplo, concentraciones elevadas de metales pesados o de compuestos orgánicos de síntesis, como fitosanitarios o bifenilos policlorados, los cuales son tóxicos y peligrosos para la salud humana, son difíciles de degradar en el proceso anaerobio y permanecen en los efluentes [125].

La Tabla 22 define los límites establecidos para el contenido de metales pesados por la normativa, a nivel europeo y estatal, para las diferentes clases de fertilizantes.

**Tabla 22.** Concentraciones máximas de metales pesados, en mg/kg de materia seca, y de impurezas, en fertilizantes en las diferentes categorías según normativa europea y española [62, 126, 129].

Clase	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg	Impurezas < 2 mm	Impurezas > 5 mm	Referencia
<b>1</b>	100	0,7	100	100	50	200	0,5	< 0,5 %	< 0,5 %	Borrador biorresiduos (Comisión Europea 2001)
<b>2</b>	150	1,5	150	150	75	400	1	< 5 %	< 5 %	
<b>A</b>	45	0,7	70	70	25	200	0,4	-	-	R.D. 824/2005*
<b>B</b>	150	2	250	300	90	500	1,5	-	-	
<b>C</b>	200	3	300	400	100	1.000	2,5	-	-	

\*En la legislación española se establecen mg/kg de materia seca en fertilizantes sólidos y mg/kg de materia fresca en fertilizantes líquidos.

Otro aspecto que limita el uso del digerido como fertilizante, al menos sin un postratamiento adecuado, es el nivel sanitario e higiénico del material, que debe cumplir unos requerimientos muy estrictos fijados por la legislación europea en los Reglamentos CE 1069/2009 [130] y CE 208/2006 [131]. En ellos se establecen las normas sanitarias aplicables a subproductos animales no destinados a consumo humano, como pueden los estiércoles y los purines y, además, se incluyen las condiciones para la higienización de los digeridos, las cuales solo se pueden alcanzar mediante la digestión anaerobia en régimen termofílico, un postratamiento térmico o el compostaje [125].

### 5.2.2. ALMACENAMIENTO

Todas las instalaciones de digestión anaerobia precisan de balsas o tanques de almacenamiento del digerido tras la salida del reactor. Deben ser impermeables y contar con un sistema de recogida de los lixiviados para imposibilitar su filtración hacia el suelo con el riesgo de contaminación de las aguas superficiales o subterráneas. Otro sistema debe permitir la recogida del biogás residual remanente en el digerido y que se libera durante los primeros momentos del almacenamiento, evitando su emisión a la atmosfera y permitiendo su recuperación. Además, es necesario que tanto balsas como tanques estén cubiertos para impedir la pérdida de nutrientes volátiles, como el amoníaco, y el aporte de agua de lluvia al digerido, con el consiguiente aumento de volumen y la reducción de la concentración de los nutrientes. Por último, la capacidad de almacenamiento debe ser suficiente para enfrentar largos períodos de tiempo sin dar salida al digerido. En síntesis, y atendiendo al postratamiento que se aplique al digerido tras la digestión anaerobia, se deben considerar diferentes posibilidades de almacenamiento [125, 126]:

- Si el digerido no es sometido a ningún proceso de separación de fases, habitualmente es un residuo con consideración líquida o líquida-sólida y se podrá almacenar tanto en tanques como en balsas. Debe colocarse protegido del viento, ser estanco, evitar la entrada de agua de lluvia y contar con una cubierta que impida la emisión de amoníaco y el biogás residual. Además, se tomarán medidas para evitar la estratificación del digerido durante el almacenamiento.
- En los casos en que se someta a un proceso de separación de fases, la fracción sólida del digerido (FSD) se podrá almacenar sobre una superficie impermeable y resistente al peso, tanto al atribuible a dicha fracción como a la de los vehículos que transporten el material. Deberá contar con un sistema de recogida de los lixiviados, y de las aguas de lluvia en los casos excepcionales en los que no exista cubierta, y que los redirijan hacia las instalaciones de almacenamiento de la fracción líquida del digerido (FLD). Respecto a esta última, se consideran las especificaciones del punto anterior, como si se tratase del digerido bruto.

### 5.2.3. GESTIÓN DEL DIGERIDO

El digerido puede ser sometido a diversos postratamientos, con el fin de mejorar algunas de sus propiedades y adecuarlo a las condiciones necesarias para su aplicación como fertilizante y/o enmienda orgánica del suelo [62, 125, 126]. Ahora bien, el digerido no siempre se somete a alguno de los procesos que se describen a continuación y puede ser aplicado directamente, dependiendo de las características del sustrato del que provenga, de los requisitos del suelo donde se utilice y de los cultivos que se dispongan en él [62, 126]. Por lo tanto, debe existir siempre una evaluación previa del valor fertilizante del digerido, tanto aquel sometido a postratamiento como sin él, y de sus efectos sobre las plantas y el suelo [132].

#### 5.2.3.1. Aplicación directa

La utilización directa del digerido bruto en la agricultura hace necesario que estos cumplan unos requerimientos de calidad mínimos, algunos de los cuales ya se han comentado con anterioridad en el Apartado 5.2.1., como son: producto higienizado y estabilizado biológicamente, con una mínima o nula presencia de compuestos contaminantes e impurezas, una concentración de nutrientes adecuada y la ausencia de olores desagradables [125].

Los digeridos provenientes de una digestión anaerobia húmeda contienen un elevado porcentaje de agua y pueden ser aplicados mediante equipos de fertirrigación, aunque condicionados por su concentración de partículas sólidas, que pueden provocar obstrucciones en los sistemas de riego [126]. Aquellos digeridos de digestiones anaerobias secas poseen una viscosidad mayor que impide su aplicación por medio de dicho sistema, por lo que deben ser aplicados de forma manual, mediante vehículos diseñados para tal fin, o mediante bombas, siempre que lo permitan las características de los digeridos.

Uno de los mayores inconvenientes que supone la aplicación de los digeridos en suelo agrícola son las pérdidas de  $\text{NH}_3$ , con la consiguiente disminución del nitrógeno disponible [62, 125, 126]. Ésta se acentúa con el incremento de la temperatura y puede llegar a ser de hasta el 90% del total de nitrógeno inorgánico contenido en el digerido [88]. Por ello, se recomienda seguir las siguientes pautas para evitar grandes pérdidas de  $\text{NH}_3$  [125, 126]:

- Aplicar el digerido en condiciones climáticas adecuadas, es decir, alta humedad, baja temperatura y ausencia de viento. La época más indicada engloba los meses que van desde febrero hasta mayo.
- Incorporar el digerido al suelo inmediatamente después de su aplicación, o hacerlo mediante inyección.

- Dificultar el proceso de volatilización del  $\text{NH}_3$ , por ejemplo, acidificando el digerido.

### 5.2.3.2. Separación de fases

La separación de fases o separación sólido-líquido es un tratamiento físico aplicable al digerido bruto cuyo el objetivo es facilitar su manejo dividiéndolo en dos fracciones, una líquida y otra sólida [62, 100]. Además, permite evitar problemas de degradación incontrolada y reducir los malos olores y las pérdidas de compuestos volátiles como el  $\text{NH}_3$  [125, 126].

Después de la separación líquido-sólido, el contenido en nutrientes permanece constante, aunque el reparto entre las fracciones es distinto, permaneciendo, mayoritariamente, el nitrógeno inorgánico en la fracción líquida, y el fósforo y el potasio en la fracción sólida junto con el nitrógeno orgánico [62, 87, 100, 125, 126, 132]. En la Tabla 23 se muestran los rangos de valores que pueden presentar las propiedades fisicoquímicas de las fracciones líquida y sólida del digerido encontradas en la bibliografía.

**Tabla 23.** Características fisicoquímicas de las fracciones líquida y sólida del digerido encontradas en la bibliografía [64, 125, 126, 133].

Parámetro	Fracción líquida del digerido	Fracción sólida del digerido
<b>Humedad (% peso)</b>	93,4 – 98,9 %	46,9 – 80,7 %
<b>pH</b>	7,8 – 8,4	7,5 – 8,5
<b>M.O. (% peso)</b>	-	39,1 – 86 %
<b>C/N</b>	3,7 – 8,3	11,2 – 19,3
<b>Carbono</b>	-	-
<b>Nitrógeno</b>	0,39 – 5,1 g/L	1,5 – 6,5 g/kg
<b>N-NH<sub>4</sub></b>	0,37 – 3,3 g/L	2,6 – 2,7 g/kg
<b>Fósforo</b>	0,03 – 1,2 g/L <sup>(1)</sup>	0,8 – 5,3 g/kg <sup>(1)</sup>
<b>Potasio (K<sup>+</sup>)</b>	0,1 – 5,2 g/L <sup>(2)</sup>	0,9 – 4,8 g/kg <sup>(2)</sup>
<b>Calcio (Ca<sup>2+</sup>)</b>	0,1 – 5 g/L <sup>(3)</sup>	3,7 – 6,5 g/kg <sup>(3)</sup>
<b>Magnesio (Mg<sup>2+</sup>)</b>	0,01 – 0,08 g/L <sup>(4)</sup>	0,9 – 1,3 g/kg <sup>(4)</sup>

(1) Como pentaóxido de difósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )

(2) Como monóxido de dipotasio ( $\text{K}_2\text{O}$ )

(3) Como monóxido de calcio ( $\text{CaO}$ )

(4) Como monóxido de magnesio ( $\text{MgO}$ )

A continuación, se recogen las ventajas más importantes de la separación de fases [125]:

- Se produce una fracción líquida con bajo contenido en sólidos, lo que facilita su manejo.
- Se reduce el contenido de metales pesados en la fracción líquida.
- Los nutrientes se presentan en forma soluble en la fracción líquida, por lo que su aplicación es más homogénea.



- Se requiere menor volumen de almacenamiento para la fracción sólida que para el digerido bruto.
- Ambas fracciones constituyen materiales más homogéneos.
- Permite aplicar distintos tratamientos a cada fracción.

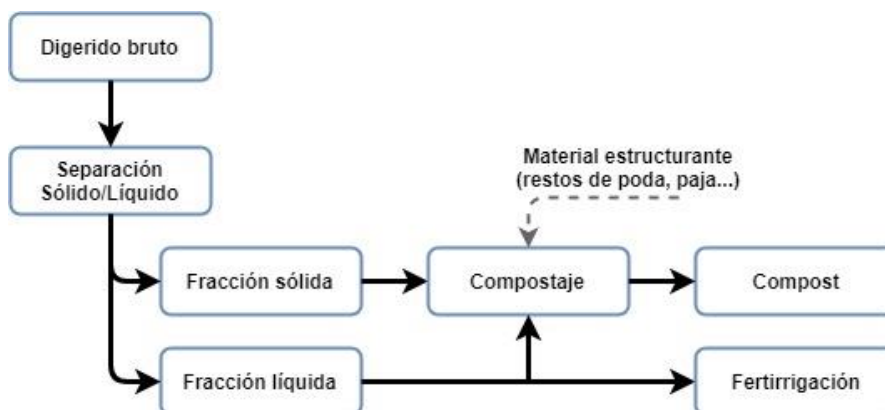
Es un proceso previo casi indispensable antes de cualquier tratamiento posterior del digerido [87], aunque también existe la posibilidad de la aplicación directa de dichas fracciones, especialmente la líquida, como aporte de nitrógeno. Cabe añadir que si la fracción líquida cumple con los requisitos impuestos en el R.D. 1620/2007, en relación a la reutilización de aguas depuradas [134], podría ser destinada a otros usos o vertida a cauce público [125, 126]. Los sistemas más utilizados para la separación líquido-sólido son el tornillo prensa y el filtro prensa para digeridos de digestiones secas, y la centrífuga y los decantadores para digeridos de digestiones húmedas [135].

### 5.2.3.3. Gestión de la fracción sólida del digerido

La aplicación directa en el campo de la FSD es una posibilidad, sin embargo, esto puede conllevar una inmovilización del nitrógeno, el desarrollo de olores o, incluso, la dispersión de semillas de malas hierbas, por lo que normalmente se somete a los sólidos separados a algún tratamiento adicional [87].

#### a) Compostaje

El tratamiento de la FSD mediante el tratamiento aeróbico o compostaje consigue la estabilización biológica de la materia orgánica contenida en el digerido, minimizando la emisión de olores, la presencia de patógenos y obteniendo un producto final con buenas propiedades fertilizantes [64, 87, 125, 126]. La Figura 41 muestra los procesos aplicados al digerido en bruto con el objetivo de obtener compost.



**Figura 41.** Diagrama de flujo del proceso de obtención de compost a partir del digerido. Adaptado de la bibliografía [62, 100].

Para lograr que el proceso se realice de forma satisfactoria se deben considerar los siguientes aspectos [125, 126]:

- **Humedad:** El contenido de humedad óptimo debe estar comprendido entre el 40 y el 60%. Si es mayor, el agua desplaza el aire ubicado en los intersticios provocando un proceso anaerobio. En el caso contrario, la actividad biológica se ve reducida y, en consecuencia, el compostaje se produce de forma más lenta. Para ajustar los valores bajos de humedad se suelen añadir los lixiviados generados durante el proceso de almacenamiento del digerido, parte de la FLD o directamente agua. Cuando existe exceso de humedad se emplean materiales estructurantes con alto contenido en sólidos, generalmente de composición lignocelulósica, tales como restos de poda, sarmientos, paja u otros similares.
- **Aireación:** Es necesario suministrar a la FSD la cantidad suficiente de oxígeno, debido a que el compostaje es un proceso aerobio, es decir, los microorganismos involucrados requieren oxígeno para su desarrollo. Una aireación pobre puede provocar la descomposición de la materia orgánica de manera anaerobia, mientras que un exceso de ventilación ralentizaría el proceso debido al enfriamiento del material. El volteo regular de la FSD o el aporte de material estructurante aumentan el número y el volumen de los intersticios y facilitan la inclusión de aire en ellos.
- **Relación C/N:** La adecuada relación entre el contenido de carbono y nitrógeno se sitúa en valores cercanos a 25, es decir, el material a compostar debe contener 25 veces más carbono que nitrógeno. Considerando que la FSD presenta relaciones C/N bajas, es necesario realizar el aporte de material adicional con elevada relación C/N.
- **Amoníaco:** Se debe tener en cuenta las posibles emisiones de nitrógeno en forma amoniacal, con la consiguiente pérdida de valor fertilizante del compost generado.
- **Temperatura:** El mantenimiento del régimen termofílico durante el tiempo suficiente permite asegurar la higienización del compost final. Las pautas recomendadas por la Comisión Europea indican que debe mantenerse una temperatura de, al menos, 55 °C durante 2 semanas si se realizan 5 volteos, de, al menos, 65 °C durante 1 semana con 2 volteos o de, al menos, 60 °C durante 1 semana si se composta en reactores o contenedores.

El proceso de compostaje, generalmente, se realiza mediante la acumulación en pilas de la FSD en una superficie impermeabilizada lo suficientemente grande, aunque también es posible que se lleve a cabo dentro de un reactor aerobio [87, 126]. Debe contar con un sistema que permite la correcta oxigenación del material, como por ejemplo una volteadora o unos ventiladores para la aireación forzada, y las canalizaciones adecuadas para la recogida de lixiviados [126].

## b) Pelletizado

La FSD puede someterse a un proceso de estabilización física mediante secado y pelletización para obtener un material sólido, que conlleva la reducción de los costes de transporte [125]. Sin embargo, al ser un proceso exclusivamente físico, no se logra la estabilización biológica, por lo que, generalmente, se emplea como tratamiento adicional después del compostaje. Además, hay que tener en cuenta que, durante el secado, el aire caliente utilizado absorbe la mayor parte del nitrógeno inorgánico en forma amoniacal, por lo que éste puede requerir de un tratamiento para evitar emisiones de  $\text{NH}_3$  [87].

En cualquier caso, no existe información suficiente sobre los efectos del material pelletizado en el suelo ni la disponibilidad y el aprovechamiento de los nutrientes [125], por lo que la pelletización, de momento, no es un tratamiento ampliamente utilizado.

### 5.2.3.4. Gestión de la fracción líquida del digerido

La gestión de la fracción líquida del digerido (FLD) obtenida tras el proceso de separación estará basada en el destino final de dicho efluente. Ésta puede ser [125, 126]:

- Aplicación directa en agricultura.
- Adecuación para uso posterior en agricultura.
- Tratamiento para la obtención de nuevos productos.
- Depuración para vertido en cauce público.
- Recirculación en el sistema de digestión anaerobia.

La primera opción consiste en su aplicación directa en suelos agrícolas mediante sistemas de fertirrigación para el aprovechamiento de los nutrientes. Al igual que ocurría con el digerido bruto de digestiones anaerobias húmedas, existen limitaciones respecto al contenido en sólidos, debido a posibles obstrucciones en las canalizaciones y en inyectores y goteros. Si es elevado, es preciso el filtrado previo a la introducción de la FLD en el sistema de riego [125, 126].

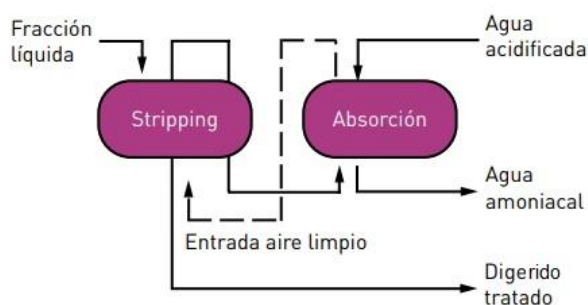
Cuando se desea valorizar separadamente alguno de los nutrientes de la FLD, adecuar dicho efluente a los requerimientos para su uso en suelo agrícola o, directamente, verter a cauce público, es necesario aplicar determinados postratamientos que permitan su destino a tales usos. En el caso del vertido a cauce público debe cumplir con los límites establecidos por el Real Decreto 1620/2007, en el que se establece el régimen jurídico para la reutilización de las aguas depuradas. A continuación, se describen los distintos tratamientos aplicables [125, 126].

### a) Recuperación de nutrientes

En este caso, el objetivo es recuperar alguno de los nutrientes de la FLD, generalmente nitrógeno o fósforo, para valorizarlo separadamente. Adicionalmente, el efluente final se puede aplicar en la agricultura y tendrá una menor concentración en nutrientes, conservando la materia orgánica. Se trata de un tratamiento adecuado cuando la elevada concentración de alguno de los nutrientes de la FLD no permita su aplicación directa en suelo agrícola [62, 100, 132].

- **Stripping**

El proceso de stripping, cuyo flujograma se muestra en la Figura 42, se basa en la volatilización del amoníaco contenido en la fracción líquida del digerido, haciendo circular aire a contracorriente. El amoníaco y otros compuestos volátiles que han sido arrastrados por la corriente de aire pasan, posteriormente, en la columna de absorción a formar parte de una corriente líquida acidificada, generalmente de  $H_2SO_4$ , obteniendo un líquido con una alta concentración de amoníaco [62, 100].

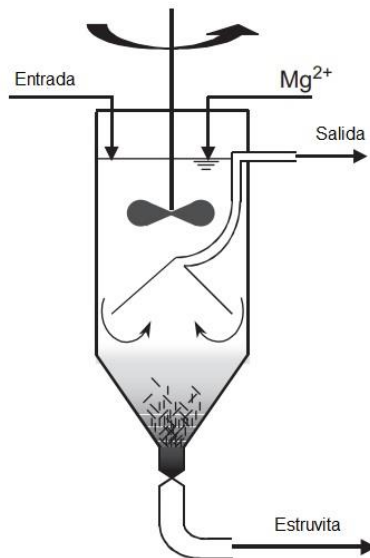


**Figura 42.** Diagrama de flujo para la recuperación de nutrientes mediante Stripping [100].

Como resultado de la aplicación de este proceso, se obtiene agua amoniacal o una sal de amonio, como, por ejemplo, sulfato de amonio, que puede ser cristalizada y valorizada separadamente. La FLD resultante del proceso posee una concentración reducida de nitrógeno amoniacal [62, 100].

- **Precipitación**

Este proceso consiste en la precipitación conjunta del nitrógeno amoniacal y el fósforo ortofosfórico contenido en la FSD mediante la adición de óxido de magnesio, formando una sal llamada estruvita (fosfato amónico magnésico hexahidratado), utilizable en la producción de fertilizantes con contenido en nitrógeno y fósforo [62, 100].



**Figura 43.** Reactor de precipitación mediante adición de óxido de magnesio para la recuperación de nutrientes [136].

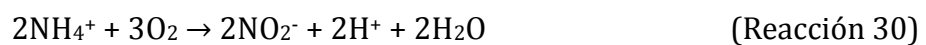
La reacción y precipitación se realiza en un depósito agitado provisto de un dosificador para los reactivos y en el cual se extraen los sólidos por la parte inferior, tal como se esquematiza en la Figura 43 [62, 100].

### b) Eliminación de nutrientes

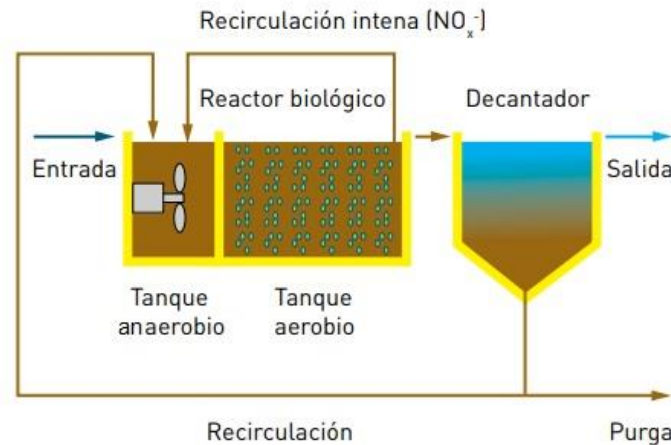
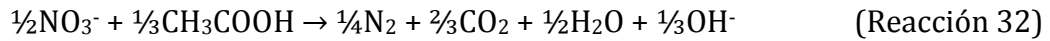
El objetivo de la eliminación de nutrientes es reducir la concentración de los macronutrientes (principalmente nitrógeno) cuando existe una problemática en su aplicación al campo por exceso de nitrógeno, asociada generalmente a zonas donde se da una elevada concentración ganadera y/o vulnerabilidad a la contaminación por nitratos.

- **Nitrificación-Desnitrificación**

El tratamiento de nitrificación-desnitrificación (NDN) es un proceso biológico que permite la eliminación del nitrógeno mediante la transformación de amonio en  $N_2$ , para, posteriormente, emitirlo a la atmósfera. Este proceso tiene lugar en dos etapas: la nitrificación y la desnitrificación. La primera es un proceso aerobio y exotérmico en el cual el amonio se oxida a nitrito y éste, después, a nitrato [62, 100], tal como se establece en las reacciones 30 y 31 [137].



La desnitrificación es la segunda y última etapa en la que, mediante un proceso anaerobio, el nitrato se reduce a  $N_2$  [62, 100], según la reacción 32. Es necesario que los microorganismos anaerobios involucrados en esta etapa tengan a su disposición material orgánico como, por ejemplo, ácido acético, metanol o etanol [137].



**Figura 44.** Diagrama del proceso de Nitrificación-Desnitrificación [100].

Todo el proceso de NDN requiere de una alternancia entre condiciones aerobias y anaerobias para la realización de ambos procesos. Para ello, habitualmente, se utilizan las siguientes soluciones tecnológicas [62, 100].

El sistema discontinuo SBR (Sequencing Batch Reactor), cuya operación está basada en un ciclo que se repite a lo largo del tiempo y que sucede en un único reactor. Las etapas de que consta el ciclo son: llenado, reacción (etapa en la cual se alternan los periodos aerobios y anaerobios), decantación, vaciado y espera.

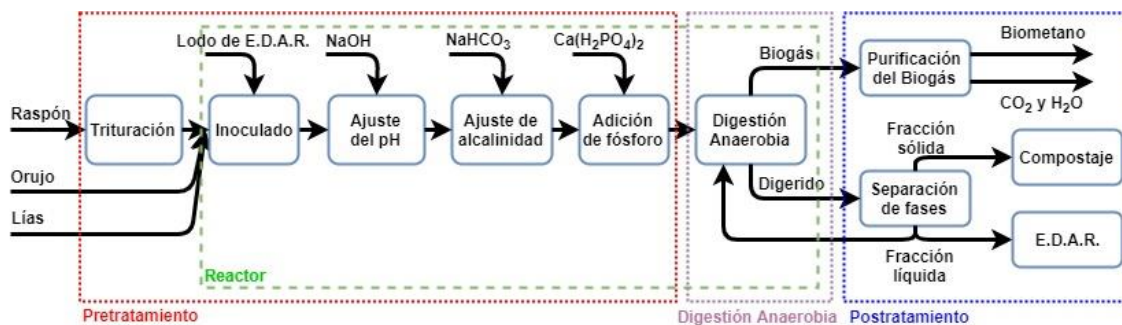
El sistema continuo, en el cual, las etapas aerobia y anaerobia se desarrollan en reactores separados para después, pasar por un decantador final que permite la separación de los fangos biológicos del líquido tratado. La Figura 44 corresponde a esta tecnología.

## 6. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

En los siguientes puntos se detallan los procedimientos para la revalorización, mediante una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, de los residuos de vinificación de una bodega de tamaño pequeño en la D.O.Ca. Rioja.

Según su finalidad, se diferencian 3 bloques, que se desarrollan de forma consecutiva: pretratamiento, digestión anaerobia y postratamiento. La Figura 45 muestra el diagrama de flujo de los procesos considerados en este proyecto y englobados en los bloques citados anteriormente.

Lo descrito ahora es un mero resumen de los apartados siguientes, realizado a posteriori, en los cuales se detallan las razones que justificarán los procesos que se llevarán a cabo.



**Figura 45.** Diagrama de flujo de los procesos para la revalorización de los residuos de vinificación. Elaboración propia.

El bloque principal, la digestión anaerobia, consta de un solo proceso donde la materia orgánica es transformada en productos con valor energético y fertilizante: el biogás y el digerido, respectivamente.

Para que la digestión anaerobia se lleve a cabo de forma satisfactoria, es necesario someter a los residuos a un pretratamiento para la adecuación de algunas de sus características. Así pues, los residuos se inoculan con digeridos de digestiones anaerobias previas, los cuales albergan comunidades activas de microorganismos, que facilitan el arranque del digestor, y se ajustarán los valores de alcalinidad, contenido de fósforo y pH mediante la adición de productos químicos. Además, el raspón será sometido, adicional y previamente a los pretratamientos citados, a un proceso de trituración para reducir su tamaño de partícula.

En el último bloque, el postratamiento, los subproductos de la digestión anaerobia, biogás y digerido, se someten a diversos procesos con el objetivo de reducir y recuperar compuestos corrosivos y tóxicos e incrementar el poder calorífico, en el



caso del biogás, y facilitar el transporte, mejorar las condiciones higiénicas y aumentar el poder fertilizante, en el caso del digerido.

## 6.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO INICIAL

Durante los apartados siguientes se definen, en concreción, las características fisicoquímicas que presentan los residuos de vinificación, la forma en la que se van a almacenar durante el tiempo entre su generación y su utilización, así como las diferentes mezclas de los citados residuos y la cantidad a introducir en el digestor anaerobio.

### 6.1.1. RESIDUOS DE PARTIDA

Para este proyecto se consideran los residuos sólidos o semisólidos más importantes que se generan en el proceso de la vinificación. Estos son el raspón, los orujos y las lías, los cuales ya han sido descritos en el apartado 1.2.3.2. En la Tabla 24 se muestran las propiedades físico-químicas y el análisis elemental de cada uno de ellos.

**Tabla 24.** Composición fisicoquímica y análisis elemental de los residuos de vinificación utilizados [138-143].

Parámetro	Unidades	Raspón	Orujo	Lías
<b>Propiedades fisicoquímicas <sup>(1)</sup></b>				
<b>pH</b>	-	4,4	3,8	4,0
<b>Densidad</b>	g/cm <sup>3</sup>	1,50	1,25	1,09
<b>Humedad</b>	% peso	68,9	48,1	82,8
<b>Cenizas</b>	% peso	9	10	9,6
<b>Sólidos totales</b>	% peso	31,1	51,9	17,2
<b>Sólidos volátiles</b>	% peso	28,3	46,7	15,55
<b>C/N</b>	-	25	28,4	23,3
<b>N/P</b>	-	20,5	13	7,1
<b>Análisis elemental <sup>(2)</sup></b>				
<b>Carbono</b>	% peso	48,23	42,6	42
<b>Hidrógeno</b>	% peso	5,82	6,2	6,9
<b>Oxígeno</b>	% peso	37,55	49,6	48,8
<b>Nitrógeno</b>	% peso	1,93	1,5	1,8
<b>Azufre</b>	g/kg	0,9	0	0
<b>Fósforo</b>	g/kg	0,94	1,15	2,52
<b>Potasio</b>	g/kg	24,4	20	3,67
<b>Sodio</b>	g/kg	0,087	0,071	0,25
<b>Calcio</b>	g/kg	9,5	9,4	9,2
<b>Magnesio</b>	g/kg	2,1	1,2	0,46
<b>Cromo</b>	mg/kg	1,4	0,1	0,2
<b>Cobre</b>	mg/kg	22	28	189
<b>Níquel</b>	mg/kg	8,7	3,5	6,3
<b>Zinc</b>	mg/kg	26	24	46

(1) Datos en base húmeda excepto cenizas y relaciones C/N y N/P, en base seca.

(2) Datos en base seca sin cenizas.



La dificultad para localizar todos los datos requeridos de manera global en una única fuente bibliográfica o, al menos, una para cada uno de los residuos considerados, ha motivado la generación de la citada tabla con datos combinados de varias fuentes distintas. Estos datos constituyen los valores de partida para la realización de este proyecto.

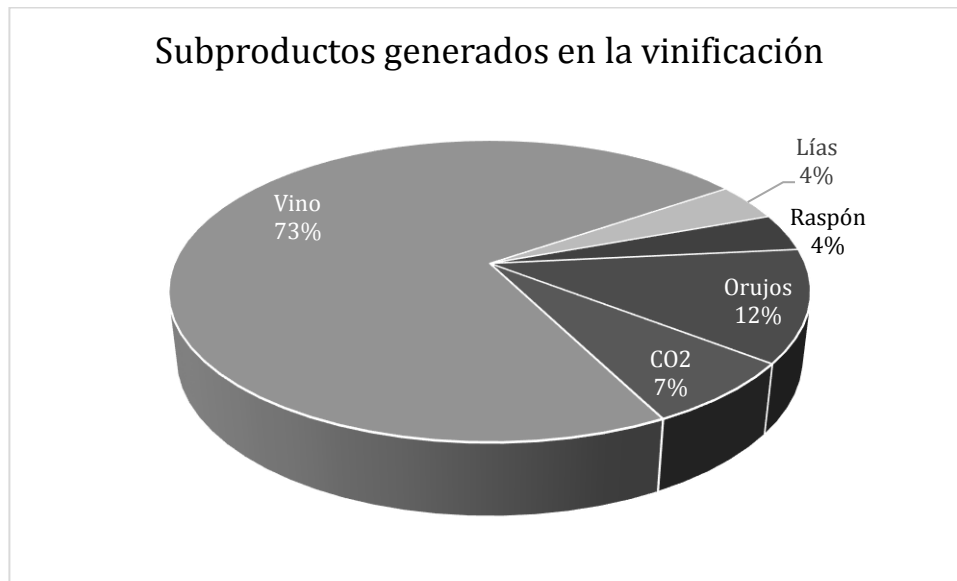
Las lías son el residuo con el mayor contenido en humedad, debido a que contiene un porcentaje elevado de vino, cuya baja calidad hace que no sea aprovechable como tal, además de aquellos productos utilizados en la clarificación del vino, generalmente sustancias viscosas con alto contenido en agua como claras de huevo, sangre animal, etc.

Por el contrario, el orujo es el subproducto de la vinificación con mayor concentración de materia orgánica, debido a un menor contenido de humedad. El estrujado y prensado de la uva extrae el mosto y desecha las partes con menor cantidad de agua: el hollejo, o piel, y las pepitas.

El raspón, en este caso húmedo, posee una elevada cantidad de agua en su interior y gran parte de su contenido de materia orgánica se encuentra en forma de celulosa, hemicelulosa y lignina, que le aportan ese aspecto leñoso. La presencia de azufre y la alta concentración de cobre en su análisis elemental probablemente sea resultado del tratado de las vides con plaguicidas con base de azufre o cobre para evitar enfermedades como el mildiu o el oídio [49].

La generación de estos residuos en la D.O.Ca. Rioja, durante el proceso de vinificación supone alrededor del 20% del peso total de la uva introducida en bodega, del cual el 20% corresponde al raspón, tanto al retirado en el despalillado como al que acompaña al orujo en la vinificación en tinto mediante maceración carbónica, el 60% a los orujos, y el último 20% a las lías. Se han tomado estos valores como referencia, a partir de datos recopilados por la Sociedad Cooperativa Agralco, los cuales se han graficado en la Figura 46. Esta sociedad se dedica a la gestión y el aprovechamiento de residuos vinícolas y engloba 260 bodegas de La Rioja, Álava, Navarra y Castilla y León [144].

La D.O.Ca. Rioja se caracteriza porque la mayoría de los productores de vino son pequeñas y medianas bodegas que elaboran hasta 3 mill. de L de vino al año [145]. Una de las más emblemáticas es Bodegas Muga, situada en Haro, oficialmente la Capital del Rioja, con una producción de alrededor de 2 millones de botellas de vino al año elaboradas a partir de 2 mill. de kg de uva [146].



**Figura 46.** Porcentaje en peso de los subproductos generados en el proceso de vinificación respecto de la cantidad de uva introducida en bodega [144].

A partir de los datos recopilados por Agralco S.C. [144], se estima que la generación de residuos de vinificación para la citada bodega, que servirá de base para el desarrollo del proyecto, se sitúa en unos 400.000 kg. De éstos, 80.000 kg corresponderían al raspón, 240.000 kg a los orujos y otros 80.000 kg a las lías.

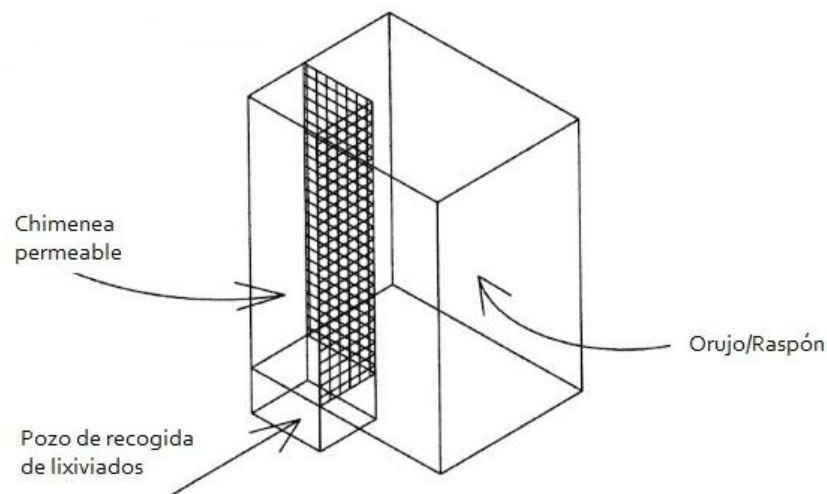
### 6.1.2. ALMACENAMIENTO DE LOS RESIDUOS

La producción de los residuos no coincide en el tiempo. Así, el raspón y los orujos son generados prácticamente a la vez, poco después de que la uva llegue a la bodega, debido a que los procesos de despalillado y prensado habitualmente suceden uno a continuación del otro. Las lías, en cambio, se obtienen después de la fermentación, a partir de 6-10 días después del prensado de la uva, aunque algunas pueden recogerse semanas o incluso meses después durante la clarificación del vino o el trasiego de barricas [49, 147, 148].

Además, la discontinuidad en el tiempo de la generación de los residuos hace que sea imprescindible almacenarlos previamente hasta acumular el volumen y las proporciones requeridos para su utilización.

El orujo y el raspón se almacenarán en pozos distintos, subterráneos, abiertos por la parte superior y protegidos contra el sol y la lluvia. La inclinación del suelo permitirá recoger los lixiviados en un pocillo que se volverán a mezclar con el resto del residuo antes de la digestión. Una vez llenado se sellará el pozo para evitar la pudrición de las capas superiores [49].

Se construirán 2 pozos de almacenamiento para los orujos y 1 para el raspón, contiguos, de hormigón en masa, con unas dimensiones de 4 metros de profundidad y una sección rectangular de 6 metros por 5 metros, con el fin de poder albergar la totalidad de los orujos y el raspón producidos en un año, 240.000 kg y 80.000 kg, respectivamente, ante posibles imprevistos que impidan su tratamiento a corto plazo. La construcción de dos pozos pequeños para los orujos en vez de uno más grande atiende a una mayor facilidad a la hora de vaciarlos. La geometría de éstos se muestra en la Figura 47.



**Figura 47.** Pozo de almacenamiento de orujos y raspón [49].

Las lías se almacenarán en 6 depósitos de madera de roble, idénticos a los mostrados en la Figura 48, retirados en años anteriores al no ser aptos para la fermentación y de una capacidad de 15.000 L cada uno [149].



**Figura 48.** Depósitos de fermentación en Bodegas Muga que se utilizarán después de su retirada para el almacenamiento de lías [149].

### 6.1.3. ANÁLISIS PORCENTUAL DE MEZCLAS

A partir de las características de los residuos se evaluarán diferentes mezclas, variando las proporciones de los residuos, con el fin de conseguir un sustrato de alimentación lo más adecuado posible para el óptimo desarrollo de la digestión anaerobia.

Uno de los parámetros más importantes es la relación entre la cantidad de carbono y la de nitrógeno, C/N, que deberá estar en un rango de 20 a 30. Por tanto, se evalúan a continuación, distintas proporciones en la mezcla de los residuos con el objetivo de adecuar la relación C/N a valores dentro de dicho rango. En la Tabla 25 se muestran los datos de las mezclas consideradas, manteniendo siempre fijo el porcentaje de orujos en un 60%, con la finalidad de no generar un desajuste entre la producción de éstos y su consumo posterior en la digestión anaerobia.

La relación C/N se ha calculado mediante la ecuación 5, sustituyendo por los valores de contenido de carbono, nitrógeno y sólidos totales mostrados en la Tabla 24 y los porcentajes de la Tabla 25.

$$C/N = \frac{(P_r \cdot ST_r \cdot C_r) + (P_o \cdot ST_o \cdot C_o) + (P_l \cdot ST_l \cdot C_l)}{(P_r \cdot ST_r \cdot N_r) + (P_o \cdot ST_o \cdot N_o) + (P_l \cdot ST_l \cdot N_l)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde,

$P_r$ ,  $P_o$  y  $P_l$  son las proporciones en la mezcla de raspón, orujo y lías, respectivamente, en porcentaje en peso, en base húmeda, recogidos en la Tabla 25,

$ST_r$ ,  $ST_o$  y  $ST_l$  son el contenido de sólidos totales en el raspón, orujo y lías, respectivamente en porcentaje en peso, en base húmeda, de la Tabla 24,

$C_r$ ,  $C_o$  y  $C_l$  son el contenido de carbono en el raspón, orujo y lías, respectivamente, en porcentaje en peso, en base húmeda, de la Tabla 24,

$N_r$ ,  $N_o$  y  $N_l$  son el contenido de nitrógeno en el raspón, orujo y lías, respectivamente, en porcentaje en peso, en base húmeda, de la Tabla 24.

**Tabla 25.** Proporciones y relación C/N del sustrato de alimentación según las diferentes proporciones de la mezcla de residuos.

	Raspón	Orujo	Lías	C/N
<b>Sustrato M1</b>	10 %	60 %	30 %	27,31
<b>Sustrato M2</b>	15 %	60 %	25 %	27,30
<b>Sustrato M3</b>	20 %	60 %	20 %	27,29
<b>Sustrato M4</b>	25 %	60 %	15 %	27,27
<b>Sustrato M5</b>	30 %	60 %	10 %	27,26

La variación de la relación C/N de los diferentes sustratos analizados apenas es significativa, resultando dentro del rango adecuado para la digestión anaerobia. Sería posible adicionar al sustrato otros materiales con alto contenido en nitrógeno y, por tanto, con una relación C/N baja, con el objetivo de afinar aún más dicha relación de nutrientes y conseguir, así, valores próximos a 25. Sin embargo, se consideran los valores de cualquiera de los sustratos propuestos correctos para la digestión.

En la Tabla 26, se muestra un análisis más completo de dichas mezclas. Los valores de pH, densidad, humedad, sólidos totales y sólidos volátiles se han obtenido a partir de la ecuación 6, el contenido de cenizas se ha calculado mediante la ecuación 7 y los parámetros del análisis elemental con la ecuación 8.

$$A_m = P_r \cdot A_r + P_o \cdot A_o + P_l \cdot A_l \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$C_m = \frac{P_r \cdot C_{zr} \cdot ST_r + P_o \cdot C_{zo} \cdot ST_o + P_l \cdot C_{zl} \cdot ST_l}{P_r \cdot ST_r + P_o \cdot ST_o + P_l \cdot ST_l} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$E_m = \frac{P_r \cdot E_r \cdot SV_r + P_o \cdot E_o \cdot SV_o + P_l \cdot E_l \cdot SV_l}{P_r \cdot SV_r + P_o \cdot SV_o + P_l \cdot SV_l} \quad (\text{Ecuación 8})$$

donde,

$P_r$ ,  $P_o$  y  $P_l$  son las proporciones en la mezcla de raspón, orujo y lías, respectivamente, en porcentaje en peso, en base húmeda,

$A_m$ ,  $A_r$ ,  $A_o$  y  $A_l$  son el parámetro seleccionado (pH, densidad, humedad, sólidos totales o sólidos volátiles), en base húmeda, de la mezcla, el raspón, el orujo y las lías, respectivamente,

$C_{zm}$ ,  $C_{zr}$ ,  $C_{zo}$  y  $C_{zl}$  son el contenido de cenizas, en porcentaje en base seca, de la mezcla, el raspón, el orujo y las lías, respectivamente,

$ST_r$ ,  $ST_o$  y  $ST_l$  son los sólidos totales, en g/kg en base húmeda, del raspón, el orujo y las lías respectivamente,

$SV_r$ ,  $SV_o$  y  $SV_l$  son los sólidos volátiles, en g/kg en base húmeda, del raspón, el orujo y las lías respectivamente, y

$E_m$ ,  $E_r$ ,  $E_o$  y  $E_l$  son el contenido del elemento químico seleccionado, C, H, O, N y S en porcentaje; P, K, Na, Ca y Mg en g/kg; y Cr, Cu, Ni y Zn en mg/kg; en base seca sin cenizas, de la mezcla, el raspón, los orujos y las lías, respectivamente.

**Tabla 26.** Composición fisicoquímica y análisis elemental para las mezclas de alimentación.

Parámetro	Unidad	Sustrato M1	Sustrato M2	Sustrato M3	Sustrato M4	Sustrato M5
<b>Propiedades fisicoquímicas<sup>(1)</sup></b>						
<b>pH</b>	-	3,92	3,94	3,96	3,98	4,0
<b>Densidad</b>	g/cm <sup>3</sup>	1,23	1,25	1,27	1,29	1,31
<b>Humedad</b>	%	60,59	59,90	59,20	58,51	57,81
<b>Cenizas</b>	%	9,87	9,84	9,81	9,79	9,76
<b>Sólidos totales</b>	g/kg	394,10	401,05	408,00	414,95	421,90
<b>Sólidos volátiles</b>	g/kg	355,21	361,58	367,96	374,34	380,71
<b>C/N</b>	-	27,31	27,30	27,29	27,27	27,26
<b>N/P</b>	-	11,98	12,43	12,90	13,37	13,86
<b>CaH<sub>b</sub>O<sub>c</sub>Na<sub>d</sub></b>	-	C <sub>31,9</sub> H <sub>55,7</sub> O <sub>27</sub> N	C <sub>31,8</sub> H <sub>55,1</sub> O <sub>26,6</sub> N	C <sub>31,8</sub> H <sub>54,5</sub> O <sub>26,2</sub> N	C <sub>31,8</sub> H <sub>54</sub> O <sub>25,9</sub> N	C <sub>31,8</sub> H <sub>53,5</sub> O <sub>25,5</sub> N
<b>Análisis elemental<sup>(2)</sup></b>						
<b>Carbono</b>	%	42,97	43,20	43,42	43,63	43,83
<b>Hidrógeno</b>	%	6,26	6,23	6,20	6,17	6,14
<b>Oxígeno</b>	%	48,53	48,10	47,68	47,27	46,88
<b>Nitrógeno</b>	%	1,57	1,58	1,59	1,60	1,61
<b>Azufre</b>	g/kg	0,07	0,11	0,14	0,17	0,20
<b>Fósforo</b>	g/kg	1,31	1,27	1,23	1,20	1,16
<b>Potasio</b>	g/kg	18,21	18,76	19,30	19,81	20,31
<b>Sodio</b>	g/kg	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08
<b>Calcio</b>	g/kg	9,38	9,39	9,40	9,41	9,41
<b>Magnesio</b>	g/kg	1,17	1,23	1,28	1,32	1,37
<b>Cromo</b>	mg/kg	0,22	0,26	0,31	0,35	0,39
<b>Cobre</b>	mg/kg	48,67	44,61	40,69	36,90	33,24
<b>Níquel</b>	mg/kg	4,28	4,41	4,54	4,66	4,77
<b>Zinc</b>	mg/kg	27,05	26,60	26,17	25,75	25,34

(1) Datos en base húmeda excepto cenizas y relaciones C/N y N/P, en base seca.

(2) Datos en base seca sin cenizas.

Todas las mezclas presentan pH demasiado ácidos y relaciones N/P elevadas para un correcto desarrollo de la digestión anaerobia. Ambos parámetros deberán adecuarse a los valores recomendados en los apartados 3.3.2. y 3.3.5., mediante el pretratamiento del sustrato.

El contenido en sólidos e, igualmente, la densidad, son mayores en aquellas mezclas con menor porcentaje de lías, debido a su elevada humedad. Es positiva una alta concentración de sólidos, especialmente volátiles, ya que de ellos determinarán el potencial máximo de producción de biogás. Sin embargo, una alta concentración implicará un bajo contenido de humedad que podría provocar una reducida actividad de los microorganismos, que necesitan de un medio acuoso suficiente para su desarrollo y proliferación. En cuanto a la densidad, no resulta un parámetro de gran importancia, debido a que no existen variaciones importantes entre una mezcla y otra.



Respecto a los micronutrientes, los elementos alcalinos y alcalinotérreos presentan concentraciones demasiado elevadas, que podrían provocar la inhibición del proceso de digestión anaerobia. Sin embargo, dicho efecto inhibitorio es producido únicamente por la parte disuelta en el medio acuoso, es decir, por los cationes de sodio, calcio, potasio y magnesio presentes en la humedad del sustrato. Hay que tener en cuenta que los valores mostrados en las Tablas 24 y 26 indican el contenido total de dichos elementos en todo el sustrato por lo se desconocen las cantidades que se encuentran disueltas. Además, los límites de concentración de cationes de dichos elementos a partir de los cuales se podría producir la inhibición del proceso dependen mucho de la presencia de posibles antagonistas, los cuales disminuyen su poder inhibitorio. El potasio es antagonista del sodio, del magnesio y del calcio; el sodio lo es del potasio, magnesio y calcio; y el calcio y el magnesio del potasio. Visto todo lo anterior, es muy difícil predecir si existirá o no inhibición por algunos de los citados elementos, por lo que se supondrá que no la hay.

De forma similar ocurre con el contenido de metales pesados, de los que se desconoce la cantidad que se encuentra disuelta, aunque, en este caso, los valores se encuentran por debajo de los límites a partir de los cuales se podría producir la inhibición del proceso. Sí es cierto que las concentraciones de cobre y zinc se acercan a los límites de inhibición mostrados en el apartado 3.3.6., pero hay que tener en cuenta que muestran el contenido total, tanto disuelto como formando parte de compuestos orgánicos e inorgánicos del sustrato. Por esta razón, no se prevén problemas de inhibición por metales pesados.

Se establece como sustrato de alimentación más adecuado respecto a los demás el sustrato M3, en base a las consideraciones expuestas anteriormente y que se resumen a continuación:

- A pesar de que otras mezclas poseen un contenido de sólidos volátiles más elevado, éste es suficientemente alto en la mezcla seleccionada y posee valores de N/P más bajos.
- La presencia de elementos potencialmente inhibitorios está en un término medio respecto al resto de mezclas.
- Las proporciones de los residuos en la mezcla son las mismas que las de generación, lo que evita desajustes entre su consumo y su generación.

#### **6.1.4. CANTIDAD DE SUSTRATO DE ALIMENTACIÓN**

Tal como se ha comentado al final del apartado 6.1.1., se parte de una bodega de tamaño pequeño, y concretamente se ha tomado como referencia Bodegas Muga, en la que se recogen al año 2 mill. de kg de uva que son transformadas en 2 mill. de botellas de vino de 0,75 L cada una. Esto supone una producción de 1,5 mill. de litros de vino anualmente [146]. La generación de residuos (raspón, orujos y lías) se sitúa

en torno al 20% de la masa total de uva [144], por lo que será necesario tratar 400.000 kg de residuos al año.

Se decide realizar la digestión anaerobia en operación discontinua, fundamentada, principalmente, en que la generación de los residuos no se produce de manera uniforme a lo largo del tiempo. Esta elección se explica con más detalle en apartados posteriores, concretamente en el apartado 6.3.1.

En consecuencia, se define la cantidad de sustrato de alimentación introducido en cada ciclo, en las proporciones establecidas para el sustrato M3, sabiendo que el volumen del digestor dependerá de este dato. Aunque en este proyecto no se contempla la construcción, con el objetivo de fundamentar la elección, hay que tener en cuenta que, un tamaño de reactor elevado reduce el coste por volumen del mismo, tal como se desprende de los datos mostrados en la Tabla 27. Ahora bien, un volumen elevado dificulta el control de los parámetros de operación y la estabilidad del proceso. Es por ello, que es necesario encontrar un punto intermedio que satisfaga ambos criterios.

La cantidad máxima de sustrato de alimentación que se podría introducir en el digestor dependiendo de su tamaño se muestra en la citada tabla y se ha calculado mediante la Ecuación 9.

$$M_s = V_d \cdot \rho_s \quad (\text{Ecuación 9})$$

donde,

$M_s$  es masa del sustrato de alimentación máxima, en kg,

$V_d$  es el volumen del digestor, en  $m^3$  y

$\rho_s$  es la densidad del sustrato de alimentación, mostrada en la Tabla 26, en  $kg/m^3$ .

**Tabla 27.** Costes aproximados de obra civil e instalaciones [150].

Volumen del digestor ( $m^3$ )	Masa de sustrato de alimentación máxima por ciclo (kg)	Presupuesto de ejecución por unidad de vol. de digestor ( $€/m^3$ )	Presupuesto total de ejecución (€)
50	63.500	1.999,85	99.992,5
100	127.000	1349,61	134.961
200	254.000	910,60	182.120
400	508.000	628,74	251.497,1
800	1.016.000	413,47	330.776
1.200	1.524.000	356,39	427.668

Considerando que la cantidad de residuos destinada a la revalorización es de 400.000 kg, la construcción de un digestor de volumen 400  $m^3$  o superior sería

sobredimensionar el mismo, mientras que un volumen de 50 m<sup>3</sup> requeriría la realización de un número elevado de ciclos anualmente. Por tanto, las alternativas más óptimas y viables son digestores que presenten volúmenes de 100 y 200 m<sup>3</sup>. Se selecciona este último ante la posibilidad de un posible aumento de la producción y, por ende, de los residuos generados. Sustituyendo en la ecuación 9 el volumen seleccionado, 200 m<sup>3</sup>, y la densidad del sustrato M3 de la Tabla 26, 1,27 Kg/m<sup>3</sup>, se obtiene la masa de sustrato máxima.

$$M_s = 200 \text{ m}^3 \cdot 1.270 \text{ kg/m}^3 = 254.000 \text{ kg}$$

Considerando un margen de seguridad mínimo del 10 % respecto al volumen, debido a que la bibliografía consultada recomienda valores entre un 10 y un 20 % [62, 87, 151], se establece, según la ecuación 10, la masa de sustrato útil ( $M_{s\text{-útil}}$ ) que podrá introducirse, como máximo, en el digestor.

$$M_{s\text{-útil}} = 0,9 \cdot M_s \quad (\text{Ecuación 10})$$

Sustituyendo en la ecuación 10 el valor de  $M_s$  obtenido anteriormente en la ecuación 9 se determina una  $M_{s\text{-útil}}$  de 228.600 kg, que obligará a la realización de la digestión anaerobia en dos ciclos anuales de 200.000 kg cada uno.

## 6.2. PRETRATAMIENTOS

El pretratamiento del sustrato de alimentación tiene el objetivo de adecuar o corregir algunas de sus características fisicoquímicas que se alejan de los requisitos para llevar a cabo de forma satisfactoria la digestión anaerobia. Son procesos físicos o químicos a los que se someterá el sustrato antes de introducirlo dentro del digestor.

A lo largo de los siguientes apartados se detallan y justifican los procesos que se llevarán a cabo durante el pretratamiento, los cuales son:

- La trituración del raspón para homogeneizar su tamaño de partícula, para mejorar su solubilización durante la hidrólisis, debido a que es el residuo de la mezcla con más contenido lignocelulósico, poco soluble. Además, la trituración permite reducir su volumen.
- La adición de un inóculo procedente de digestiones anaerobias de E.D.A.R. para acelerar el arranque del digestor.
- El ajuste del valor de pH mediante la adición de NaOH, debido a que se encuentra muy por debajo de los requeridos para la digestión anaerobia.
- El aumento de la alcalinidad mediante la adición de bicarbonato sódico (NaHCO<sub>3</sub>) para amortiguar la posible acidificación del sustrato durante la digestión.
- El ajuste de la relación N/P mediante la adición de superfosfato triple (SPT).

### 6.2.1. TRITURACIÓN DEL RASPÓN

De los tres residuos utilizados en este proyecto, los orujos y las lías ya poseen una uniformidad y un tamaño de partícula adecuados para su entrada en el reactor. El raspón, en cambio, debe ser triturado para reducir su volumen y tamaño de partícula y facilitar la mezcla con el resto de los residuos.

Además, debido a que el raspón es la parte más leñosa del racimo y, por tanto, posee un alto contenido de materia lignocelulósica, la cual presenta una difícil degradación, mediante la trituración se logra aumentar la superficie expuesta favoreciendo su solubilización en el proceso hidrolítico, el más limitante de la digestión anaerobia [62]. Ello contribuye a una mayor tasa de producción de biogás y una reducción del tiempo de digestión [87, 152].



**Figura 49.** Trituradora de raspón CME TR50 [153].

No se procederá a la trituración del raspón inmediatamente después del despalillado para evitar la pérdida de humedad durante su almacenamiento, sino que se realizará justo antes de su introducción en el digestor mediante una trituradora específicamente diseñada para este cometido. Se ha elegido una CME TR50, mostrada en la Figura 49, que corresponde con el modelo con una potencia del motor de 4 kW y una tasa de trituración de 50.000 kg/h [153]. El objetivo es conseguir un tamaño de partícula inferior a los 10 mm, recomendado en la bibliografía [152].

### 6.2.2. INTRODUCCIÓN DE LA MEZCLA EN EL DIGESTOR

El transporte de los raspones entre el pozo y el digestor se realizará en dos etapas diferenciadas. La primera, desde el pozo de raspones hasta la trituradora, se llevará a cabo mediante el aspirador neumático mostrado en la Figura 50, modelo ASP 501/P, con una potencia del motor de 11 kW y una tasa de aspiración entre 35.000

y 40.000 kg/h. La segunda etapa, que discurre entre la trituradora hasta el digestor, se efectuará con ayuda de remolques de capacidad de hasta 7.000 kg [32] utilizados para el transporte de uva entre la viña y la bodega. El pesado de la cantidad de raspón para cada ciclo del proceso de digestión anaerobia, fijada anteriormente en 40.000 kg, se realizará durante el remolcado utilizando para ello la báscula de la bodega. La descarga de los raspones desde el remolque al digestor se efectuará a través de una abertura con una puerta con cierre hermético situada en el muro de éste.



**Figura 50.** Aspiradora de raspón ASP 501/P [154].

Los orujos se extraerán depositándolos manualmente sobre una pequeña cinta transportadora, denominada de manera coloquial saca-orujos. El extremo final se colocará sobre la tolva de una bomba que impulsará los orujos y los transportará mediante conducciones hasta el digestor. La bomba utilizada (véase Figura 51) será lobular rotativa de la marca Enoveneta, modelo PL35, de potencia del motor de 5 kW y una capacidad de bombeo de hasta 25.000 L/h. Asimismo, cuenta con un accesorio, concretamente un caudalímetro, que permitirá medir el volumen de orujos [155].



**Figura 51.** Bomba lobular rotativa Enoveneta PL35 utilizada para bombear los orujos y las lías [155].

Por último, las lías de vinificación, se bombearán directamente desde los depósitos de madera, donde se almacenan hasta el digestor mediante la misma bomba utilizada para el transporte de los orujos.

### 6.2.3. INOCULADO

Uno de los mayores problemas que presentan los digestores anaerobios discontinuos radica en la generación de los microorganismos encargados de metabolizar la materia orgánica cada vez que se inicia un nuevo ciclo. Es un proceso lento, pero que puede acortarse con la adición de un inóculo, esto es, materia orgánica ya digerida previamente de forma anaerobia y en la cual ya existe una población activa de microorganismos anaerobios.

A la hora de seleccionar un inóculo es importante considerar aquellos que posean una elevada actividad metanogénica, ya que reducirán en mayor medida el tiempo de arranque del digestor [64].

Para el primer arranque se utilizará como inóculo los lodos procedentes de la depuración de aguas residuales que han sido estabilizados anaerobiamente en rango mesofílico a 35 °C en la Estación de Depuración de Aguas Residuales (E.D.A.R.) de Logroño. Este tipo de inóculo es el más utilizado debido a su disponibilidad y la gran variedad de microorganismos contenidos en él. Además, se espera que presente una suficiente actividad metanogénica, entre 0,2 y 0,5 g DQO<sub>CH4</sub>/g SV·día [64], que permitirá emplear cantidades reducidas de inóculo y evitar, con ello, la dilución excesiva del sustrato, debido a su alto contenido de humedad.

Se utilizarán 20.000 L de inóculo para el primer arranque del digestor, lo que constituye aproximadamente el 10% del volumen del sustrato de alimentación, en base a las recomendaciones descritas en bibliografía para inóculos con alta actividad metanogénica [64]. Tal cantidad podrá ser modificada si los ensayos experimentales realizados en laboratorio, previamente a la digestión anaerobia, aconsejan la utilización de otra proporción inóculo-sustrato.

Las características esperadas del inóculo se han establecido a partir de 3 lodos de E.D.A.R. diferentes encontrados en la bibliografía [156-158] y tabulados en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Características de inóculos en base húmeda y valores seleccionados para el inóculo a utilizar [64, 156-158].

Parámetro	Unidades	Rango de valores de los lodos de E.D.A.R.	Valores intermedios seleccionados del inóculo
<b>pH</b> <sup>(1)</sup>	-	7,15 – 7,49	7,32
<b>Densidad</b> <sup>(1)</sup>	g/cm <sup>3</sup>	0,97	0,97
<b>Humedad</b> <sup>(1)</sup>	% peso	96,36 – 97,89	97,13
<b>Cenizas</b> <sup>(2)</sup>	% peso	28,91 – 45,5	37,20
<b>Sólidos totales</b> <sup>(1)</sup>	g/kg	21,1 – 36,4	28,75
<b>Sólidos volátiles</b> <sup>(1)</sup>	g/kg	12,1 – 18,5	18,05
<b>Actividad metanogénica</b>	g DQO <sub>CH<sub>4</sub></sub> /g SV·día	~ 0,2	0,2
<b>Carbono</b> <sup>(3)</sup>	% peso	40,74 – 50,95	45,84
<b>Hidrógeno</b> <sup>(3)</sup>	% peso	7,19 – 7,32	7,25
<b>Oxígeno</b> <sup>(3)</sup>	% peso	33,55 – 47,36	40,45
<b>Nitrógeno</b> <sup>(3)</sup>	% peso	6,68 – 8,71	7,70
<b>Fósforo</b> <sup>(3)</sup>	% peso	2,50	2,50

(1) Datos en base húmeda.

(2) Datos en base seca.

(3) Datos en base seca sin cenizas.

Considerando la elevada humedad del inóculo y, en consecuencia, la escasa cantidad de sólidos totales, se estima que la variación de la composición elemental de los micronutrientes del sustrato inoculado en base seca es despreciable. Sí que se calcula la alteración del contenido de los macronutrientes: carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, debido a su importancia en la estimación de la producción máxima de biogás, y las propiedades físico-químicas, según las ecuaciones 11 y 12.

$$M_{mi} = \frac{M_m \cdot SV_m + 0,1 \cdot (M_i \cdot SV_i)}{1,1 \cdot SV_{mi}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

donde,

$M_{mi}$  es el macronutriente seleccionado (carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno), en porcentaje en peso, en base seca sin cenizas, del sustrato M3i,

$M_m$  es el macronutriente seleccionado (carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno), en porcentaje en peso, en base seca sin cenizas, del sustrato M3, de la Tabla 26,

$M_i$  es el macronutriente seleccionado (carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno), en porcentaje en peso, en base seca sin cenizas, del inóculo elegido, de la Tabla 28,

$SV_{mi}$  son los sólidos volátiles, en g/kg, en base húmeda, del sustrato M3i,

$SV_m$  son los sólidos volátiles, en g/kg, en base húmeda, del sustrato M3 y



SV<sub>i</sub> son los sólidos volátiles, en g/kg, en base húmeda, del inóculo elegido.

$$A_{mi} = \frac{A_m + 0,1 \cdot A_i}{1,1} \quad (\text{Ecuación 12})$$

donde,

A<sub>mi</sub> el parámetro seleccionado (pH, densidad, humedad, sólidos totales o sólidos volátiles), en base húmeda, del sustrato M3i,

A<sub>m</sub> el parámetro seleccionado (pH, densidad, humedad, sólidos totales o sólidos volátiles), en base húmeda, de la mezcla M3, de la Tabla 26 y

A<sub>i</sub> el parámetro seleccionado (pH, densidad, humedad, sólidos totales o sólidos volátiles), en base húmeda, del inóculo elegido, de la Tabla 28.

En la Tabla 29 se recopilan las características del sustrato inoculado M3i calculadas a partir de las ecuaciones 11 y 12 junto con las del sustrato M3 de la Tabla 26.

**Tabla 29.** Propiedades fisicoquímicas y análisis elemental del sustrato M3 y M3i.

Parámetro	Unidades	Sustrato M3	Sustrato M3i
<b>Propiedades fisicoquímicas <sup>(1)</sup></b>			
<b>pH</b>	-	3,96	4,27
<b>Densidad</b>	g/cm <sup>3</sup>	1,27	1,24
<b>Humedad</b>	% peso	59,20	62,65
<b>Cenizas</b>	% peso	9,81	10,01
<b>Sólidos totales</b>	g/kg	408,00	373,52
<b>Sólidos volátiles</b>	g/kg	367,96	336,15
<b>C/N</b>	-	27,29	26,91
<b>N/P</b>	-	12,90	11,96
<b>CaHbOcNd</b>	-	C <sub>31,8</sub> H <sub>54,5</sub> O <sub>26,2</sub> N	C <sub>31,4</sub> H <sub>53,8</sub> O <sub>25,8</sub> N
<b>Análisis elemental <sup>(2)</sup></b>			
<b>Carbono</b>	% peso	43,42	43,43
<b>Hidrógeno</b>	% peso	6,20	6,21
<b>Oxígeno</b>	% peso	47,68	47,59
<b>Nitrógeno</b>	% peso	1,59	1,61
<b>Azufre</b>	g/kg	0,14	0,14
<b>Fósforo</b>	g/kg	1,23	1,35
<b>Potasio</b>	g/kg	19,30	19,20
<b>Sodio</b>	g/kg	0,09	0,09
<b>Calcio</b>	g/kg	9,40	9,35
<b>Magnesio</b>	g/kg	1,28	1,27
<b>Cromo</b>	mg/kg	0,31	0,31
<b>Cobre</b>	mg/kg	40,69	40,49
<b>Níquel</b>	mg/kg	4,54	4,51
<b>Zinc</b>	mg/kg	26,17	26,04

(1) Datos en base húmeda excepto cenizas y relaciones C/N y N/P, en base seca.

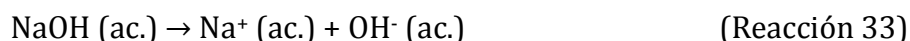
(2) Datos en base seca sin cenizas.

Para los siguientes arranques se utilizará una parte de la fracción líquida del propio digerido generado en el proceso de digestión anterior y que supondrá, también, el 10 % del volumen del sustrato introducido en el digestor. Se prevé que dicha fracción poseerá una elevada humedad y bajo contenido en sólidos, una baja relación C/N y un pH alcalino, a similitud del inóculo inicial utilizado.

#### 6.2.4. AJUSTE DEL pH

El sustrato M3i, es decir, ya inoculado, presenta un pH ácido, de 4,27. Para que la digestión anaerobia se produzca de manera satisfactoria, el valor del pH debe estar próximo a la neutralidad, pudiendo fluctuar entre los 6,5 y 7,5, tal como se ha establecido en el apartado 3.3.2., y siendo preferibles valores ligeramente alcalinos.

Se utilizará una disolución 0,1 M de sosa cáustica (NaOH), debido a que al ser una base fuerte se disocia completamente (véase reacción 33) en el medio acuoso formado por la humedad del sustrato, por lo que será necesaria menos cantidad para elevar el pH hasta 7,2 que utilizando otros compuestos.



A partir de la ecuación 13, conociendo que el pH antes de la adición de NaOH es 4,27 y que después será 7,2, se calcula el pOH, inicial y final.

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Sustituyendo en la ecuación 13 los valores anteriores se tiene que el pOH inicial es 9,73 y el pOH final, una vez adicionado NaOH será de 6,8.

Se obtienen ahora los moles por litro de iones  $\text{OH}^-$  antes y después de añadir NaOH mediante la ecuación 14.

$$\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-] \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde la concentración viene dada como molaridad (mol/L).

Al sustituir los valores de pOH inicial y pOH final, calculados anteriormente, se obtienen  $1,862 \cdot 10^{-10}$  mol  $\text{OH}^-$ /L, inicialmente, y  $1,585 \cdot 10^{-7}$  mol  $\text{OH}^-$ /L, finalmente. La diferencia entre estos valores constituye los moles de iones  $\text{OH}^-$  por litro que son necesarios aportar al sustrato para la elevación de su pH hasta 7,2, es decir,  $1,583 \cdot 10^{-7}$  mol  $\text{OH}^-$ /L

Teniendo en cuenta la reacción 33, la pureza del producto y la humedad del sustrato, se realiza el cálculo mediante factores de conversión establecidos en la ecuación 15, a partir de los cuales se obtiene la cantidad de disolución de NaOH que es necesario aportar por cada kg de sustrato M3i para elevar el pH del sustrato hasta 7,2.

$$\begin{aligned}
 & \frac{1,583 \cdot 10^{-7} \text{ moles OH}^-}{1 \text{ L}_{\text{humedad}}} \cdot \frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol OH}^-} \cdot \frac{1 \text{ L}_{\text{disolución}}}{0,1 \text{ mol NaOH}} \\
 & \cdot \frac{1.000 \text{ mL}_{\text{disolución}}}{1 \text{ L}_{\text{disolución}}} \cdot \frac{0,592 \text{ L}_{\text{humedad}}}{1 \text{ kg}_{\text{sustrato}}} \quad \text{(Ecuación 15)} \\
 & = 0,000937 \frac{\text{mL}_{\text{disolución}}}{\text{kg}_{\text{sustrato}}}
 \end{aligned}$$

Dado que cada ciclo de digestión anaerobia se realizará con lotes de 220.000 kg de sustrato M3i, la cantidad total de disolución de NaOH 0,1M que será necesario adicionar en cada ciclo se establece en 206,17 ml. Se añadirán directamente sobre el sustrato M3i, ya introducido en el digestor, mediante un dosificador electrónico y previamente al mezclado.

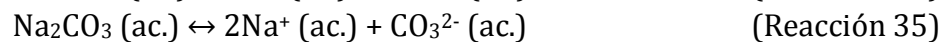
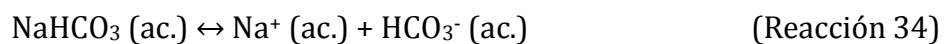
Teniendo en cuenta que la cantidad de producto utilizado es muy pequeño, el incremento de la humedad, de la alcalinidad o de los problemas asociados al aumento de sodio en el sustrato por este aditivo se pueden considerar despreciables.

### 6.2.5. AJUSTE DE LA ALCALINIDAD

La alcalinidad mide la capacidad de una solución a resistirse a variar su pH. Los valores recomendados para que las reacciones dadas en el reactor se produzcan de manera óptima varían entre los 2.500 y los 6.500 mg CaCO<sub>3</sub>/L, siendo más favorables aquellos más cercanos a los 2.500 mg CaCO<sub>3</sub>/L.

La alcalinidad de los residuos de vinificación empleados en este proyecto se desconoce, sin embargo, algunas fuentes bibliográficas consultadas muestran valores de entre 2.200 y 2.500 mg CaCO<sub>3</sub>/L para algunos efluentes vinícolas y mezclas de residuos de vinificación con otros materiales [159, 160]. Se toma como referencia la media entre los citados datos, 2.350 mg CaCO<sub>3</sub>/L, con el fin de calcular el aporte necesario de alcalinidad en dicho supuesto, teniendo en cuenta que en la práctica se deberán realizar las mediciones oportunas para establecer la alcalinidad real del sustrato.

Se utilizará como aporte alcalino bicarbonato sódico (NaHCO<sub>3</sub>), debido a que no produce un aumento del pH. El producto utilizado para ello tiene un contenido de NaHCO<sub>3</sub> del 99,3% y un 0,5% de carbonato sódico (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) [161]. Las reacciones 34 y 35 muestran la disociación de estos compuestos en disolución acuosa.



Se obtiene a continuación la cantidad de producto que habrá que adicionar al sustrato para aumentar la alcalinidad hasta los 2.500 mg CaCO<sub>3</sub>/L a partir de las

ecuaciones 16, 17 y 18. Tal como se ha comentado anteriormente, se ha tomado como referencia una alcalinidad inicial de 2.350 mg CaCO<sub>3</sub>/L.

$$\left[ \frac{0,993 \frac{\text{gNaHCO}_3}{\text{g}_{\text{prod}}} \cdot \frac{1 \text{ molHCO}_3}{1 \text{ molNaHCO}_3} \cdot \frac{61 \text{ gHCO}_3}{\text{molHCO}_3}}{\frac{84 \text{ gNaHCO}_3}{1 \text{ molNaHCO}_3} \cdot \frac{1,22 \text{ gHCO}_3}{1 \text{ gCaCO}_3}} \right] \cdot X [\text{g}_{\text{prod}}/\text{L}] \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$= 0,591 \cdot X \text{ gCaCO}_3/\text{L}$$

$$\left[ \frac{0,005 \frac{\text{gNa}_2\text{CO}_3}{\text{g}_{\text{prod}}} \cdot \frac{1 \text{ molCO}_3}{1 \text{ molNa}_2\text{CO}_3} \cdot 60 \frac{\text{gCO}_3}{\text{molCO}_3}}{106 \frac{\text{gNa}_2\text{CO}_3}{\text{molNa}_2\text{CO}_3} \cdot 0,6 \frac{\text{gCO}_3}{\text{gCaCO}_3} \cdot 1 \text{ L}} \right] \cdot X [\text{g}_{\text{prod}}/\text{L}] \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$= 0,00472 \cdot X \text{ gCaCO}_3/\text{L}$$

$$0,591X + 0,00472X = \frac{(2,5 - 2,35) \text{ g CaCO}_3}{L_{\text{humedad}}} \rightarrow$$

$$X = 0,252 \frac{\text{g}_{\text{prod}}}{L_{\text{humedad}}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

El resultado indica que habrá que añadir 0,252 g del producto por cada litro de humedad del sustrato para elevar la alcalinidad a 2.500 mg CaCO<sub>3</sub>/L. En relación con la masa de sustrato, la cantidad de producto a añadir vendrá dada por la ecuación 19.

$$\frac{0,252 \text{ g}_{\text{prod}}}{L_{\text{humedad}}} \cdot \frac{0,592 L_{\text{humedad}}}{\text{kg}_{\text{sustrato}}} = 0,149 \frac{\text{g}_{\text{prod}}}{\text{kg}_{\text{sustrato}}} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Al considerar la masa de sustrato M3i en cada ciclo de 220.000 kg, se obtienen 32,79 kg de producto, que se deberán añadir en cada ciclo de digestión anaerobia sobre el sustrato.

A diferencia de la adición de NaOH en el ajuste de pH, donde el aporte de sodio es muy pequeño y se considera despreciable, en este caso se debe considerar su aumento, debido a que las cantidades añadidas de carbonato y bicarbonato sódico son significativas. A partir de la ecuación 20 se calcula el incremento de sodio debido al aditivo.

$$\frac{0,149 \text{ g}_{\text{prod}}}{1 \text{ kg}_{\text{sustrato}}} \cdot \left[ \frac{0,993 \text{ g NaHCO}_3}{1 \text{ g}_{\text{prod}}} \cdot \frac{23 \text{ g Na}}{84 \text{ g NaHCO}_3} + \frac{0,005 \text{ g Na}_2\text{CO}_3}{1 \text{ g}_{\text{prod}}} \cdot \frac{46 \text{ g Na}}{106 \text{ g Na}_2\text{CO}_3} \right] = 0,0408 \frac{\text{g de Na}}{\text{kg}_{\text{sustrato}}} \quad (\text{Ecuación 20})$$

La cantidad de sodio en el sustrato después del ajuste de la alcalinidad es la suma entre el valor obtenido de la Ecuación 20 y el dado en la Tabla 29 para el sustrato M3i, cuyo resultado es 0,129 g de Na/kg de sustrato.

Análogamente al ajuste de pH, el producto se adicionará manualmente sobre el sustrato M3i, previamente al mezclado.

### 6.2.6. ADICIÓN DE FÓSFORO

La relación óptima de nutrientes N/P en la digestión anaerobia debe estar entre 5 y 7. Es decir, para que las reacciones se produzcan de manera correcta las bacterias consumen entre 5 y 7 veces más cantidad de nitrógeno que de fósforo. Relaciones superiores o inferiores podrían ralentizar la formación de biogás, empobreciéndolo o, incluso, inhibiendo el proceso.

Se hace necesario incrementar el contenido de fósforo en la mezcla de alimentación para ajustar la relación N/P mediante la adición de superfosfato triple (SFT) con fórmula  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  y una concentración media del 46% medida en  $\text{P}_2\text{O}_5$ . La elección de este producto para el aumento de fósforo viene motivada por su contenido nulo de nitrógeno, evitando así el desajuste de la relación C/N.

La cantidad de fósforo que es necesaria añadir para lograr una relación N/P de 6 se obtiene mediante la ecuación 21 y los datos de N y P del sustrato M3i mostrados en la Tabla 30.

$$\frac{16,1 \text{ g N/kg}}{(1,35 + X) \text{ g P/kg}} = 6 \rightarrow X = 1,34 \text{ g P/kg}_{\text{sustrato}} \quad (\text{Ecuación 21})$$

Se calcula a continuación, y a partir de la ecuación 22, la cantidad a adicionar de SFT por cada kg de sustrato M3i para incrementar en 1,34 g/kg el contenido de fósforo y, con ello, ajustar la relación N/P a un valor de 6.

$$\frac{0,46 \text{ g P}_2\text{O}_5}{1 \text{ g SFT}} \cdot \frac{62 \text{ g P}}{142 \text{ g P}_2\text{O}_5} \cdot X \left[ \frac{\text{g SFT}}{\text{kg}_{\text{sustrato}}} \right] = 1,34 \text{ g P/kg}_{\text{sustrato}} \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$\rightarrow X = 6,67 \text{ g SFT/kg}_{\text{sustrato}}$$

Al multiplicar el resultado por la cantidad de sustrato, 220.000 kg, se obtiene que la cantidad a adicionar de SFT en cada ciclo se sitúa en 1.468,44 kg, que se añadirán una vez se hayan introducido todos los residuos dentro del digestor y, previamente, al mezclado.

Se debe considerar el incremento del contenido de calcio debido a la adición de SPT, que, según el fabricante, es del 14 % en peso del total. Éste se calcula según la ecuación 23.

$$\frac{6,67 \text{ g SPT}}{1 \text{ kg}_{\text{sustrato}}} \cdot \frac{0,14 \text{ g Ca}}{1 \text{ g SPT}} = 1,10 \text{ g Ca/kg}_{\text{sustrato}} \quad (\text{Ecuación 23})$$

La cantidad de calcio en el sustrato después de la adición de SFT es la suma entre el valor obtenido de la ecuación 23 y el mostrado en la Tabla 29 para el sustrato M3i, que resulta en 10,29 g de Ca/kg de sustrato.

### 6.2.7. MEZCLADO

Es importante que todos los materiales que componen el sustrato de alimentación se mezclen por completo para lograr:

- Una distribución homogénea de los distintos residuos: raspón, orujos y lías.
- Una inoculación efectiva.
- Una correcta acción de los reactivos utilizados en el pretratamiento para la corrección del pH, la alcalinidad y la relación N/P.

El tiempo e intensidad de mezclado para llevar a cabo esta tarea son complicadas de determinar de forma teórica, ya que dependen de las propiedades del sustrato, el tamaño del digestor, la tendencia a la formación de costra y otras variables. Por ello, la bibliografía muestra que, en la práctica, estos parámetros se establecen de forma empírica y se optimizan mediante la experiencia en anteriores digestiones anaerobias [64].

El mezclado se realizará mediante el mismo sistema de agitación que se utilizará durante el proceso de digestión anaerobia propiamente dicho. Este sistema se describe más adelante en el apartado 6.3.5.

Las características del sustrato inoculado y pretratado (M3ip) se resumen en la Tabla 30.

**Tabla 30.** Composición fisicoquímica y análisis elemental del sustrato de alimentación inoculado y pretratado (M3ip).

Parámetro	Unidades	Sustrato inoculado y pretratado (M3ip)
<b>Propiedades fisicoquímicas <sup>(1)</sup></b>		
<b>pH</b>	-	7,2
<b>Densidad</b>	g/cm <sup>3</sup>	1,24
<b>Humedad</b>	% peso	62,65
<b>Cenizas</b>	% peso	10,01
<b>Sólidos totales</b>	g/kg	373,52
<b>Sólidos volátiles</b>	g/kg	336,15
<b>C/N</b>	-	26,91
<b>N/P</b>	-	6
<b>CaH<sub>b</sub>O<sub>c</sub>N<sub>d</sub></b>	-	C <sub>31,4</sub> H <sub>53,8</sub> O <sub>25,8</sub> N

(1) Datos en base húmeda excepto cenizas y relaciones C/N y N/P, en base seca.

(2) Datos en base seca sin cenizas.

**Tabla 30.** Composición fisicoquímica y análisis elemental del sustrato de alimentación inoculado y pretratado (M3ip) (continuación).

Parámetro	Unidades	Sustrato inoculado y pretratado (M3ip)
<b>Análisis elemental <sup>(2)</sup></b>		
<b>Carbono</b>	% peso	43,43
<b>Hidrógeno</b>	% peso	6,21
<b>Oxígeno</b>	% peso	47,59
<b>Nitrógeno</b>	% peso	1,61
<b>Azufre</b>	g/kg	0,14
<b>Fósforo</b>	g/kg	2,69
<b>Potasio</b>	g/kg	19,20
<b>Sodio</b>	g/kg	0,13
<b>Calcio</b>	g/kg	10,29
<b>Magnesio</b>	g/kg	1,27
<b>Cromo</b>	mg/kg	0,31
<b>Cobre</b>	mg/kg	40,49
<b>Níquel</b>	mg/kg	4,51
<b>Zinc</b>	mg/kg	26,04

(1) Datos en base húmeda excepto cenizas y relaciones C/N y N/P, en base seca.

(2) Datos en base seca sin cenizas.

### 6.3. SELECCIÓN Y DISEÑO DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIO

En los posteriores subapartados se definen aquellos aspectos relativos al diseño y operación del digestor anaerobio así como los sistemas auxiliares.

#### 6.3.1. TIPO DE DIGESTOR

Debido a la estacionalidad de la producción de uva, la mayor parte de los residuos generados en la industria vinícola se concentra durante las semanas posteriores a la vendimia. Por ello, no se recomienda la selección de digestores anaerobios que trabajen en régimen continuo, debido a la intermitencia en la producción de residuos.

Tal como ya se ha indicado en el apartado 6.1.4. se ha establecido que la digestión anaerobia se realice en un digestor anaerobio discontinuo. Esto implicará un funcionamiento cíclico durante los períodos en los que exista material residual de vinificación.

En vista del volumen recomendado del digestor, establecido en 200 m<sup>3</sup> en el apartado 6.1.4., se definen ahora las dimensiones y forma de éste. Se considera que una configuración prismática de planta circular favorecerá las operaciones de mezclado y agitado al evitar aristas en las paredes que puedan provocar el estancamiento del sustrato y, con ello, zonas con diferencia de temperatura, acumulación de reactivos, material sin digerir, etc.



Las dimensiones del digestor se fijan en 8 m de diámetro (D) en su base y su techo y una altura (h) de 4 m. El objetivo es establecer un diseño compacto, esto es, sin sobredimensionar ninguna de las medidas respecto de las otras y con las cuales se logre el volumen ligeramente mayor al determinado en el apartado 6.1.4.

El volumen real del digestor ( $V_d$ ) se sitúa en 201,06 m<sup>3</sup>, tal como se calcular a partir de la ecuación 24.

$$V_d = \Pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h \quad (\text{Ecuación 24})$$

Se ha optado como material para su construcción de un hormigón tipificado según la instrucción española de hormigón estructural EHE-08 [160] como HA-35/P/20/IIa+Qc, recomendado con unanimidad en la bibliografía consultada para su utilización en digestores anaerobios, con un de un espesor de 30 cm para las paredes y la base y de 25 cm para la cubierta [62, 162, 163].

Además, el digestor contará con un aislamiento térmico en los muros y la cubierta que permita reducir las pérdidas de calor, de poliuretano expandido de 10 cm de espesor y revestido con una lámina de 40 mm de grosor de metal galvanizado pintada de color verde para proteger el material de aislamiento de los efectos del clima [62].

Es conveniente definir los materiales más importantes de construcción, debido a que en los cálculos que se realizan en el apartado 6.3.3. para el diseño del sistema de calentamiento del digestor aparecen algunas de sus propiedades.

### **6.3.2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN**

En los apartados que se incluyen aquí se definen los valores de los parámetros de operación bajo los cuales funcionará el digestor anaerobio, es decir, únicamente se establecen los objetivos numéricos en los que operará éste. Sin embargo, el control de estos parámetros, así como el equipo encargado de ello, se determina dentro de los apartados del 6.3.3. al 6.3.5.

#### **6.3.2.1. Temperatura**

Se trabajará en régimen mesofílico a una temperatura de 35 °C. Se descarta el régimen termofílico debido al gran aporte energético requerido y ser innecesaria la eliminación de patógenos de los residuos. Además, el régimen mesofílico presenta menores problemas de inestabilidad y de inhibición por elementos que se vuelven más tóxicos a altas temperaturas.

### 6.3.2.2. pH

Aunque las recomendaciones sitúan como valor adecuado para el pH en 7,0, en este caso se mantendrá el citado parámetro en valores ligeramente alcalinos, próximos a 7,2. Esto permite un mayor tiempo a la hora de corregir posibles descensos del pH, que se realizará mediante la adición de NaOH, y disminuir el riesgo de una acidificación irreversible del ambiente en el interior del digestor.

### 6.3.2.3. Alcalinidad

Como se ha dicho, la alcalinidad es una medida de la capacidad del sustrato para amortiguar la caída del pH ante la posible acidificación dentro del digestor provocada por la acumulación de ácidos, habitualmente por ácidos grasos volátiles. Se trata de una alternativa indirecta, aunque más fiable, para el control del pH.

A la entrada del digestor anaerobio el sustrato muestra una alcalinidad de 2.500 mg CaCO<sub>3</sub>/L, valor que se mantendrá a lo largo del proceso mediante la adición, si fuera necesario, del mismo producto utilizado en el pretratamiento y que se describe en el apartado 6.2.5.

### 6.3.2.4. Tiempo de arranque y de digestión

Según la Tabla 3 mostrada en el apartado 3.3.1., el tiempo que se requiere para la digestión anaerobia en régimen mesofílico a 35 °C se sitúa alrededor de 23 días. Sin embargo, este dato está más orientado a digestores anaerobios continuos, en los que en todo momento hay una población activa suficiente de microorganismos que permiten una degradación constante de la materia orgánica. En el caso de este proyecto, se cuenta con un digestor anaerobio que trabajará en modo discontinuo por lo que se necesitará un período adicional al inicio de cada ciclo, conocido como tiempo de arranque, para que la población microbiológica vuelva a ser generada por completo.

No se han encontrado datos en fuentes bibliográficas que aproximen siquiera el tiempo de arranque para digestores anaerobios discontinuos. Es por ello, que la determinación de este dato vendrá establecida para futuras digestiones, de acuerdo a la experiencia en procesos anteriores.

### 6.3.2.5. Agitación

La agitación puede realizarse de manera continua o intermitentemente. La práctica ha demostrado que la agitación tiene que optimizarse empíricamente para adecuarse a las especificaciones de la planta de biogás como, por ejemplo, las características del sustrato, el tamaño del digestor, la tendencia a la formación de costra [87] y la estratificación, etc.

Se ha optado por mantener una agitación constante a baja potencia, con la finalidad favorecer el ascenso del biogás generado y evitar en todo momento la formación de costra en la superficie que impida su recolección. También se prevé impedir la estratificación del sustrato logrando una distribución uniforme de la temperatura y la dispersión de los agregados de bacterias anaerobias.

La bibliografía establece potencias de agitación por volumen de entre 5 y 8 W/m<sup>3</sup> que, para este caso, un digestor anaerobio de volumen 200 m<sup>3</sup>, supone una potencia de entre 1 y 1,6 kW. Se decide realizar la agitación a la menor potencia, que podrá ser incrementada si durante el proceso no se cumplen los objetivos previstos anteriormente.

### 6.3.3. SISTEMA DE CALEFACCIÓN

Las necesidades de calor de un digestor anaerobio vienen motivadas por dos aspectos:

- Aumentar la temperatura del sustrato de alimentación, que se encontrará a la de ambiente, hasta la temperatura de operación, siendo ésta de 35 °C.
- Compensar las pérdidas de calor que se producen a través de los muros, la base y la cubierta de digestor anaerobio.

#### a) Calentamiento del sustrato

Para el cálculo del calor que necesario aportar al sustrato para alcanzar la temperatura de operación se utiliza la Ecuación 25.

$$Q_s = M_s \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (\text{Ecuación 25})$$

donde,

$Q_s$  es el calor necesario aportar al sustrato, en kJ,

$M_s$  es masa de sustrato, en kg,

$c_p$  es el calor específico del sustrato, en kJ/kg·K y

$\Delta T$  es el incremento de temperatura, en K.

La masa de sustrato ( $M_s$ ) se ha fijado con anterioridad en 220.000 kg. A fin de simplificar los cálculos, no se ha considerado el aumento de la masa de sustrato debido a los aditivos.

La bibliografía consultada [168] sitúa el calor específico de los residuos de vinificación utilizados, raspón, orujos y lías, en 3,34, 3,61 y 3,09 kJ/kg·K,

respectivamente. Se toma como calor específico del sustrato el valor medio, teniendo en cuenta la proporción de cada residuo, que resulta en 3,45 kJ/kg·K.

El incremento de temperatura viene dado por la diferencia entre la temperatura de operación del digestor anaerobio y la ambiental. La primera ya se ha establecido en 35 °C en el apartado 6.3.2.1. En cuanto a la segunda, se toma como referencia 12,2 °C, que es la temperatura media en la ciudad de Haro durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, obtenida a partir de los datos recogidos durante los últimos 10 años por la Estación Meteorológica de Haro y que se muestran en la Tabla 31 [166]. Se prevé que a lo largo de estos meses se realice la digestión anaerobia de los residuos.

**Tabla 31.** Temperaturas medias, en °C, en la ciudad de Haro para los meses de octubre, noviembre y diciembre durante el período 2009-2018, recogidos por la Estación meteorológica de Haro [166].

Año	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2009	18,2	14,9	10,9	5,5
2010	18,1	13,0	8,5	4,9
2011	20,0	14,6	11,3	7,4
2012	18,3	13,8	8,8	7,2
2013	18,1	15,2	8,8	5,1
2014	19,6	16,3	10,8	6,4
2015	16,4	13,6	10,3	6,9
2016	19,3	14,1	9,0	6,2
2017	16,9	15,4	8,4	6,3
2018	19,7	13,2	9,7	8,3

Sustituyendo en la Ecuación 25 los datos definidos en los párrafos anteriores se tiene que el aporte de calor necesario para calentar el sustrato a la temperatura de operación se estima en:

$$Q_s = 220.000 \text{ kg} \cdot \frac{3,45 \text{ kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (308 \text{ K} - 285,2 \text{ K}) = \mathbf{17.305.200 \text{ kJ}}$$

Se pretende que el calentamiento del sustrato se realice en un máximo de 48 horas, para evitar la degradación indeseada de la materia orgánica mediante microorganismos no anaerobios. Por tanto, la tasa calorífica requerida por el sustrato viene determinada por la Ecuación 26.

$$\dot{Q}_s = \frac{Q_s}{t} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Sustituyendo, se obtiene:

$$\dot{Q}_s = \frac{17.305.200 \text{ kJ}}{48 \text{ h} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}} = \mathbf{100,15 \text{ kW}}$$

## b) Pérdidas de calor

Por otro lado, para el cálculo de la tasa de pérdida de calor a través del muro, base y cubierta del digestor se emplea la ecuación 27.

$$\dot{Q}_p = U_p \cdot A_p \cdot \Delta T_p \quad (\text{Ecuación 27})$$

donde,

$\dot{Q}_p$  es la tasa de pérdida de calor del digestor, en W,

$U_p$  es el coeficiente global de transmisión de calor a través de las paredes del digestor, en  $W/m^2 \cdot K$ ,

$A_p$  es el área por la que se produce la pérdida de calor, en  $m^2$  y

$\Delta T_p$  es la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, en K.

Antes de utilizar la ecuación 27 es necesario determinar los valores de los datos contenidos en ella, por lo que se empleará más adelante.

Para obtener la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del digestor se ha fijado, al igual que para el cálculo del calor a aportar al sustrato, una temperatura del aire del exterior de 12,2 °C. Se considera que la temperatura del suelo es la misma que la del aire. Como ya se ha indicado a lo largo del proyecto, en el interior del digestor se ha establecido una temperatura de 35 °C.

Con respecto al área, el cálculo se realiza mediante las ecuaciones 28 y 29 para el muro y la base y la cubierta, respectivamente.

$$A_p = 2 \cdot \Pi \cdot R \cdot h \quad (\text{Ecuación 28})$$

$$A_p = \Pi \cdot R^2 \quad (\text{Ecuación 29})$$

donde,

R es el radio de la base o de la cubierta, en m y

h es la altura, en m.

Estos datos aparecen en la Tabla 32 junto con el resultado de su aplicación en las ecuaciones 28 y 29.

**Tabla 32.** Valores del radio, altura y área de la base, muro y cubierta del digestor anaerobio.

	R (m)	h (m)	A <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> )
<b>Base</b>	4	-	50,27
<b>Muro</b>	-	4	100,53
<b>Cubierta</b>	4	-	50,27

Por último, el coeficiente global de transmisión de calor es una característica propia del digestor y depende de los materiales que lo componen y de sus espesores. Se puede calcular, en este caso, mediante la ecuación 30.

$$\frac{1}{U_p} = \frac{1}{h_e} + \frac{e_h}{k_h} + \frac{e_{pu}}{k_{pu}} + \frac{1}{h_s} \quad (\text{Ecuación 30})$$

donde,

$h_e$  es el coeficiente de convección del exterior, aire o suelo, a la temperatura del mismo, en W/m<sup>2</sup>·K,

$e_h$  es el espesor de hormigón, en m,

$k_h$  es la conductividad térmica del hormigón, en W/m·K,

$e_{pu}$  es el espesor del aislamiento de poliuretano, en m,

$k_{pu}$  es la conductividad térmica del poliuretano, en W/m·K y

$h_s$  es el coeficiente de convección del sustrato a la temperatura de operación, en W/m<sup>2</sup>·K.

Para el cálculo aproximado del coeficiente global de transmisión de calor pueden tomarse los siguientes datos que aparecen en la Tabla 34, algunos de ellos recogidos de la bibliografía [62, 167]. Debido a la consistencia semisólida del sustrato se ha considerado el coeficiente de convección como infinito [167]. En la misma tabla se han incluido también la tasa de pérdida de calor y el coeficiente global de transmisión de calor, calculadas mediante las ecuaciones 27 y 30.

**Tabla 33.** Valores de espesor, coeficiente de convección, conductividad térmica, coeficiente global de transmisión de calor y tasa de pérdida de calor de la base, muro y cubierta del digestor anaerobio.

	$e_h$ (m)	$e_{pu}$ (m)	$h_s$ (W/m <sup>2</sup> ·K)	$h_e$ (W/m <sup>2</sup> ·K)	$k_h$ (W/m·K)	$k_{pu}$ (W/m·K)	$U_p$ (W/m <sup>2</sup> ·K)	$\dot{Q}_p$ (kW)
<b>Base</b>	0,3	-	∞	58,11	1,63	-	4,97	5,70
<b>Muro</b>	0,3	0,1	∞	23,24	1,63	0,023	0,22	0,50
<b>Cubierta</b>	0,25	0,1	∞	23,24	1,63	0,023	0,22	0,25

En suma, la tasa de pérdida de calor a través de las paredes del digestor anaerobio se sitúa en 6,45 kW.

**c) Equipo de calefacción**

Una vez conocidas las necesidades caloríficas, se procede al diseño del equipo de calefacción. Éste se dimensiona para los requerimientos del calentamiento del sustrato, mucho más exigentes que para la compensación de las pérdidas de calor a través de las paredes del digestor.

Se opta por una calefacción interior, es decir, situada dentro del digestor, dado que, en este caso, constituye el método más simple. En base a las recomendaciones bibliográficas [62, 167], el intercambio de calor se producirá mediante una tubería de acero inoxidable de 3 cm de diámetro y espesor 0,25 cm, fijada al muro interno del digestor y por la que circulará agua caliente como fluido transmisor a una temperatura de entrada de 80 °C y de salida de 50 °C.

Se procede ahora a calcular la longitud necesaria de la misma, en base a estas condiciones, mediante las Ecuaciones 31, 32 y 33.

$$A_i = \frac{Q_s}{U_t \cdot \Delta T_{ln}} \quad \text{(Ecuación 31)}$$

$$L = \frac{A_i}{\pi \cdot D_i} \quad \text{(Ecuación 32)}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{a,e} - T_{s,f}) - (T_{a,s} - T_{s,i})}{\ln \frac{(T_{a,e} - T_{s,f})}{(T_{a,s} - T_{s,i})}} \quad \text{(Ecuación 33)}$$

donde,

$A_i$  es el área interna de la tubería, en  $m^2$ ,

$U_t$  es el coeficiente de transmisión de calor a través de la tubería, en  $W/m^2 \cdot K$ ,

$\Delta T_{ln}$  es el incremento medio logarítmico de la temperatura, en K,

$L$  es la longitud de la tubería, en m,

$D_i$  es el diámetro interno de la tubería, en m,

$T_{a,e}$  y  $T_{a,s}$  son la temperatura del agua a la entrada y salida, respectivamente, en °C, y



$T_{s,i}$  y  $T_{s,f}$  son la temperatura del sustrato inicial y final, respectivamente, en °C.

Se determina la temperatura media logarítmica resolviendo la ecuación 33:

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(80\text{ °C} - 35\text{ °C}) - (50\text{ °C} - 12,2\text{ °C})}{\ln \frac{(80\text{ °C} - 35\text{ °C})}{(50\text{ °C} - 12,2\text{ °C})}} = 41,3\text{ °C}$$

Para resolver las ecuaciones 31 y 32 es necesario calcular el coeficiente global de transmisión de calor, utilizando para ello la ecuación 34.

$$\frac{1}{U_t} = \frac{1}{h_a} + \frac{e_t}{k_{ac}} + \frac{1}{h_s} \quad (\text{Ecuación 34})$$

donde,

$h_a$  es el coeficiente de convección del agua a la temperatura promedio, en  $W/m^2 \cdot K$ ,

$e_t$  es el espesor de la pared de la tubería, en m,

$k_{ac}$  es la conductividad térmica del acero inoxidable, en  $W/m \cdot K$ ,

El valor del espesor de la pared de la tubería ya ha sido definido con anterioridad en 0,25 cm. La conductividad del acero inoxidable puede establecerse en  $14\text{ W/m} \cdot K$  según datos consultados en la bibliografía [168]. El coeficiente de convección del sustrato se ha considerado infinito en la sección anterior [167].

El único dato que hace falta hallar es el coeficiente de convección entre el flujo de agua y la pared interna de la tubería. Para ello, lo primero es calcular el número de Reynolds para determinar si se está en régimen laminar o turbulento (véase ecuación 35). No obstante, se requiere cuantificar previamente la velocidad del agua según la Ecuación 36.

$$Re = \frac{V \cdot D_i}{\nu} \quad (\text{Ecuación 35})$$

$$V = \frac{\dot{Q}_s}{\Pi \cdot \frac{D_i^2}{4} \cdot \rho_a \cdot c_p \cdot (T_{a,e} - T_{a,s})} \quad (\text{Ecuación 36})$$

donde,

Re es el número de Reynolds, adimensional,

V es la velocidad del agua dentro de la tubería, en m/s,

$D_i$  es el diámetro interior de la tubería, en m,

$\nu$  es la viscosidad cinemática del agua a la temperatura promedio, en  $m^2/s$ ,

$\rho_a$  es la densidad del agua a la temperatura promedio, en  $kg/m^3$  y

$c_p$  es el calor específico del agua a la temperatura promedio, en  $J/kg\cdot K$ .

A partir de la bibliografía [168] y conociendo que la temperatura promedio del agua entre la entrada y la salida es  $65\text{ }^\circ\text{C}$ , se obtienen los valores de  $\nu$ ,  $\rho_a$ ,  $c_p$  y  $k_a$ , que se exhiben en la Tabla 34.

**Tabla 34.** Propiedades del agua a  $65\text{ }^\circ\text{C}$ : viscosidad cinemática, densidad, calor específico y conductividad térmica y número de Prandtl [168].

	T ( $^\circ\text{C}$ )	$\nu$ ( $m^2/s$ )	$\rho_a$ ( $kg/m^3$ )	$c_p$ ( $J/kg\cdot K$ )	$k_a$ ( $W/m\cdot K$ )	Pr (-)
<b>Agua</b>	65	$4,42\cdot 10^{-7}$	980,6	4184	0,6591	2,752

Los datos reflejados en la Tabla 34 junto con la tasa  $Q_s$  calculada en la ecuación 26, el  $D_i$  y las  $T_{a,e}$  y  $T_{a,s}$ , se sustituyen en las ecuaciones 35 y 36 para determinar la velocidad del agua y, con ella, el número de Reynolds.

$$V = \frac{100.150\text{ W}}{\pi \cdot \frac{0,025^2\text{ m}^2}{4} \cdot 980,6\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4184\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (353 - 323)\text{K}} = 1,66\text{ m/s}$$

$$Re = \frac{1,66\text{ m/s} \cdot 0,025\text{ m}}{4,42 \cdot 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}} = 93.755$$

Como se ha obtenido un número de  $Re > 10.000$ , el flujo de agua dentro de la tubería es turbulento.

A continuación, se hallará el número de Nusselt según la ecuación de Colburn (véase Ecuación 37), adecuada para tubos lisos en flujo turbulento y para números de Prandtl entre 0,7 y 160 [168]. Ambos criterios se cumplen.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad (\text{Ecuación 37})$$

El resultado de la ecuación 37 se muestra a continuación:

$$Nu = 0,023 \cdot 93.755^{0,8} \cdot 2,752^{\frac{1}{3}} = 306,11$$

Ahora, la Ecuación 38 permite calcular el coeficiente de convección entre el agua y la pared interna de la tubería.

$$h_a = \frac{Nu \cdot k_a}{D_i} \quad (\text{Ecuación 38})$$

donde,

$k_a$  es la conductividad térmica del agua a la temperatura promedio, en  $W/m \cdot K$ , de la Tabla 34.

$$h_a = \frac{306,11 \cdot 0,6591 \text{ W/m} \cdot \text{K}}{0,025 \text{ m}} = 8.070,20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

En consecuencia, ahora se puede determinar el coeficiente global de transmisión de calor,  $U_t$ , sustituyendo los datos obtenidos en la ecuación 34, tal como sigue:

$$U_t = \frac{1}{\frac{1}{8.070,20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{0,0025 \text{ m}}{14 \text{ W/m} \cdot \text{K}} + \frac{1}{\infty}} = 3.305,96 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Por último, se emplean las Ecuaciones 31 y 32 para calcular el área necesaria de tubería para el intercambio de calor y la longitud de la misma.

$$A_i = \frac{100.150 \text{ W}}{3.305,96 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 41,3 \text{ K}} = 0,73 \text{ m}^2$$

$$L = \frac{0,73 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0,025 \text{ m}} = 9,34 \text{ m}$$

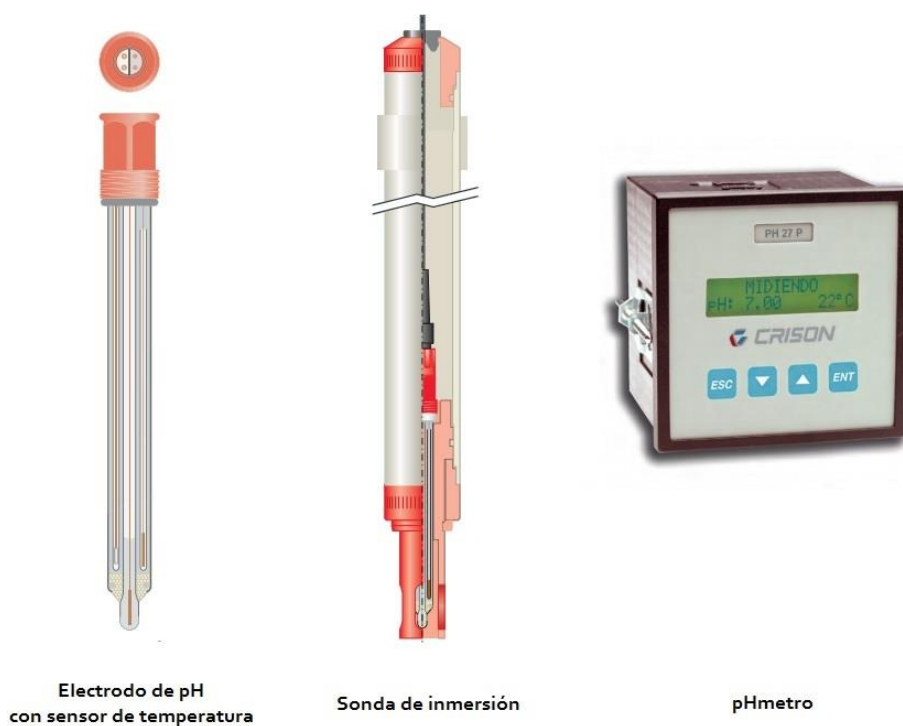
En síntesis, se necesitarán instalar 9,34 m de tubería de acero inoxidable de 3 cm de diámetro y espesor 0,25 cm por la que fluirá agua caliente a 80 °C en la entrada y 50 °C a la salida para calentar el sustrato de alimentación desde la temperatura ambiental 12,2 °C hasta la temperatura de operación 35 °C. El agua de calefacción provendrá del circuito de refrigeración del equipo de cogeneración encargado de la generación eléctrica a partir del biogás producido en la instalación.

Para compensar las pérdidas de calor en el digestor anaerobio durante la operación, el sistema de calefacción entrará en funcionamiento cuando la temperatura de operación caiga por debajo de los 34 °C y permanecerá en activo hasta alcanzar una temperatura de 36 °C. Conviene recordar que en régimen mesofílico se recomienda que la temperatura de operación se mantenga en un rango de  $\pm 2$  °C, cuando la temperatura fijada es de 35 °C

### 6.3.4. CONTROL DE pH, TEMPERATURA Y ALCALINIDAD

Para la monitorización del pH y la temperatura se empleará el equipo de la Figura 52, que consta de 3 electrodos de pH con sonda de inmersión de la marca Crison, modelo 53-34, que incluye sensor de temperatura Pt 1000 y permiten mediciones en toda la escala de pH y en un rango de temperaturas entre 0 y 100 °C [169, 170].

Se colocarán en el muro del digestor a alturas de 1, 2 y 3 m con el objetivo de detectar la posible estratificación del sustrato. Estos electrodos estarán conectados a un pHmetro de la misma marca, Crison, modelo PH 27P que mostrará las distintas medidas de pH y temperatura con el fin de actuar ante posibles desviaciones de los parámetros de operación [171].



**Figura 52.** Equipo para la monitorización del pH y la temperatura [169-171].

En cuanto al control de la alcalinidad, se tomarán muestras del sustrato 3 veces por semana y se analizarán en laboratorio para determinar su alcalinidad. La toma de muestras se realizará mediante un dispositivo de la marca Emerson, modelo Neotech PV (véase Figura 53), adecuado para las condiciones de operación y las características del sustrato [172].



**Figura 53.** Equipo de toma de muestras [172].

Para la introducción de los reactivos durante la operación del digestor anaerobio se emplearán 2 bombas dosificadoras, una para la disolución 0,1M de NaOH encargada del ajuste del pH y otra para el producto mezcla de  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 99,3 y 0,5%, respectivamente, encargado del ajuste de alcalinidad. La primera será una bomba de membrana de la marca Milton Roy, modelo LMI-C DSD, adecuada para reactivos químicos y microcaudales a partir de 0,009 mL/h [173], entrará en funcionamiento cuando el pH descienda por debajo de 7,0.



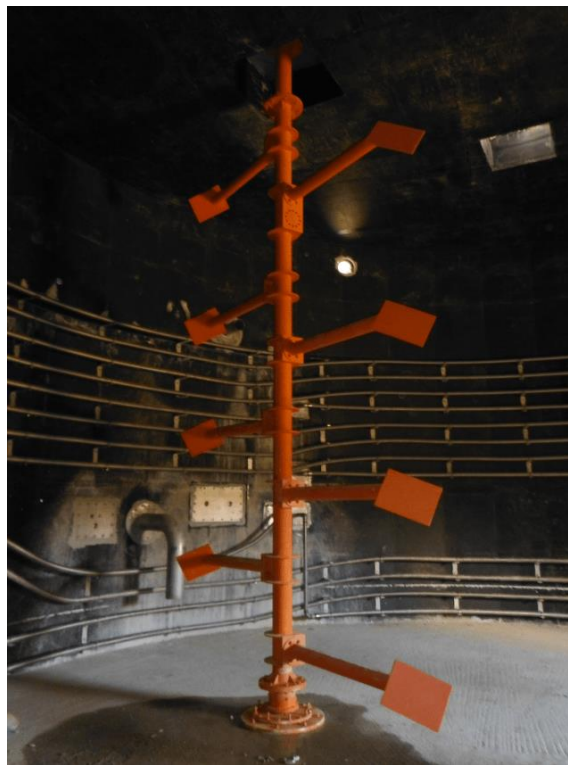
**Figura 54.** Bomba dosificadora Milton Roy LMI-C-DSD [173].

En cuanto a la segunda, será una bomba dosificadora de sólidos de la marca Lambda modelo Doser, con capacidad de suministro hasta 50 g de reactivo por minuto [174], y que operará cuando la alcalinidad de alguna de las muestras disminuya a concentraciones menores de 2.350 mg CaCO<sub>3</sub>/L.

### 6.3.5. AGITADOR

La agitación del sustrato se realizará por medio de un agitador de paletas, los cuales son idóneos para materiales con alto contenido de sólidos ya que no provoca regímenes turbulentos en el sustrato y se evita la dispersión de los agregados de microorganismos.

Se opta por el agitador de paletas vertical de la marca Armatec-FTS, que opera en un rango de potencias entre 1 y 13,5 kW a revoluciones bajas de hasta 10 rpm y puede instalarse en reactores con una altura máxima de 8 m [175].



**Figura 55.** Agitador de paletas de la marca Armatec-FTS [175].

En este caso, el agitador será de altura 4 m, se instalará en el centro del digestor anaerobio y se prevé que opere a una potencia de 1 kW.

### 6.3.6. SALIDA DE BIOGÁS

En la cubierta del digestor anaerobio, al inicio de la conducción de salida del biogás se instalará el caudalímetro (véase Figura 56), de la marca Krohne, modelo Optisonic 7300 Biogás [176], para la medición del caudal de biogás generado. Las características del mismo son las siguientes:

- Apto para biogás seco o húmedo a bajas presiones con alto contenido de CO<sub>2</sub>.
- Medida integrada de temperatura y de contenido en CH<sub>4</sub>.
- Resistente a compuestos corrosivos del biogás.
- Error máximo del  $\pm 1 \%$ .
- No necesita mantenimiento periódico.



**Figura 56.** Caudalímetro Krohne Optisonic 7300 Biogás para la medición del caudal de biogás [176].

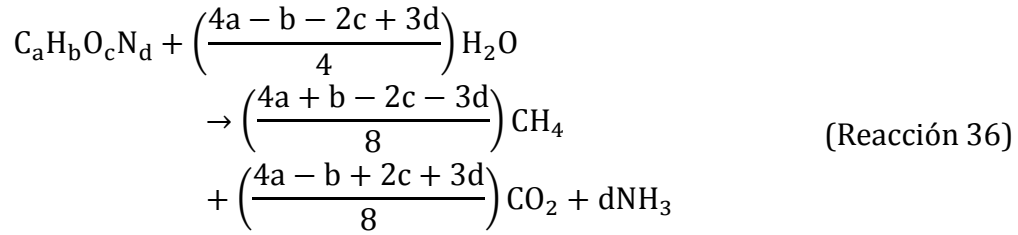
## 6.4. GESTIÓN DEL BIOGÁS

En los siguientes apartados se establece el camino que va a seguir el biogás desde que es recogido del digestor anaerobio hasta que puede ser aprovechado energéticamente.

### 6.4.1. PRODUCCIÓN ANUAL

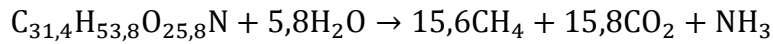
Antes de considerar el postratamiento y el almacenamiento del biogás, se debe cuantificar el volumen que se prevé producir. A partir de la fórmula empírica de la Tabla 30 del sustrato M3ip, C<sub>31,4</sub>H<sub>53,8</sub>O<sub>25,8</sub>N, se utiliza la ecuación 39 obtenida a partir de la reacción 36 según el modelo de Buswell para el cálculo de la producción máxima teórica de CH<sub>4</sub> [64, 177].





$$P_{CH_4, Buswell} = \frac{(4a + b - 2c - 3d) \cdot 22,4}{(12a + b + 16c + 14d) \cdot 8} \frac{L_{CH_4}}{g_{SV}}
 \tag{Ecuación 39}$$

Sustituyendo por los subíndices de la fórmula empírica del sustrato M3ip en la reacción 36 se obtiene la reacción de descomposición de la materia orgánica contenida en el sustrato M3ip para generar CH<sub>4</sub>.



Y al sustituir por los subíndices en la ecuación 39 y utilizar el dato del contenido de sólidos volátiles del sustrato M3ip de la Tabla 30, se obtiene la producción de CH<sub>4</sub> por kg de sustrato.

$$\begin{aligned}
 P_{CH_4, Buswell} &= \frac{(4 \cdot 31,4 + 53,8 - 2 \cdot 25,8 - 3 \cdot 1) \cdot 22,4}{(12 \cdot 31,4 + 53,8 + 16 \cdot 25,8 + 14 \cdot 1) \cdot 8} \frac{L_{CH_4}}{g_{SV}} \cdot \frac{336,15 g_{SV}}{1 kg_{sustrato}} \\
 &= 137 \frac{L_{CH_4}}{kg_{sustrato}}
 \end{aligned}$$

Según el modelo de Buswell, la producción máxima de CH<sub>4</sub> que puede producir el sustrato M3ip es de 137 L de CH<sub>4</sub> por cada kg de éste.

Puesto que las dimensiones del depósito de almacenamiento de biogás dependen del volumen generado al año, es necesario estimar la producción de biogás anual mediante la ecuación 40. Se ha considerado un contenido del 61,7 % de CH<sub>4</sub> en el biogás a partir del dato experimental extraído de la bibliografía [178] y que, aproximadamente, se ajusta a lo establecido en la Tabla 4 del apartado 3.3.2.

$$P_{Biogás, año} = P_{CH_4, Buswell} \cdot M_s \cdot \%_{vol, CH_4}
 \tag{Ecuación 40}$$

donde,

$P_{biogás, año}$  es la producción de biogás anual, en L/año,

$M_s$  es la masa de sustrato M3ip digerida anual, en kg y

$\%_{vol, CH_4}$  es el porcentaje en volumen de CH<sub>4</sub> contenido en el biogás.

Al resolver la ecuación 40, se obtiene que:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{Biogás,año}} &= \frac{137 \text{ L}_{\text{CH}_4}}{\text{kg}_{\text{sustrato}}} \cdot 440.000 \text{ kg}_{\text{sustrato}} \cdot \frac{1 \text{ L}_{\text{biogás}}}{0,617 \text{ L}_{\text{CH}_4}} \\
 &= 97.698.541 \frac{\text{L}_{\text{Biogás}}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ Nm}^3_{\text{biogás}}}{1000 \text{ L}_{\text{biogás}}} = 97.698,5 \text{ Nm}^3_{\text{biogás}}/\text{año}
 \end{aligned}$$

Ya se ha comentado que este valor corresponde a la producción máxima. Sin embargo, en la práctica no se puede alcanzar debido a varios motivos [64, 178]:

- Alrededor de un 10% del sustrato no interviene en la síntesis de biogás.
- Es habitual que una parte de la materia orgánica del sustrato no sea biodegradable en las condiciones de operación establecidas o, incluso, no pueda ser degradada anaerobiamente.
- Pueden existir déficits puntuales de nutrientes que limiten la degradación de la materia.

Es por estos motivos que se espera una producción de biogás un 30% menor que la calculada mediante el modelo de Buswell [177, 179]. Por esta razón se estima que la producción de biogás anual será de 68.389 Nm<sup>3</sup>.

## 6.4.2. PURIFICACIÓN

El biogás generado se someterá al postratamiento o purificación que permitirá:

- Adecuarlo a los requisitos de los equipos de aprovechamiento.
- Evitar los problemas de corrosión en tuberías y equipos.
- Disminuir la problemática en su gestión, debido a su volumen.

Dado que el biogás formado tiene su origen en biomasa agroindustrial, que no presenta concentraciones significativas de compuestos de azufre, orgánicos volátiles halogenados, siloxanos ni NH<sub>3</sub>, se considera que la presencia de éstos tampoco será significativa en el biogás. Ante esto, se someterá al gas únicamente a procesos de eliminación de H<sub>2</sub>O y de CO<sub>2</sub>. El primero con objeto de evitar la corrosión en tuberías debido a su condensación, y el segundo con el fin de incrementar el poder calorífico del biogás y reducir su volumen para facilitar su almacenamiento.

### 6.4.2.1. Eliminación del H<sub>2</sub>O

El biogás a la salida del digestor anaerobio se encuentra saturado de vapor de agua (véase Tabla 13 del apartado 5.1.1.). Para la remoción del H<sub>2</sub>O se van a aprovechar las temperaturas ambientales bajas para lograr su condensación y permitir una fácil recogida. Para ello, se instalará una denominada trampa de humedad en la línea de

salida del biogás, entre el digester anaerobio y las instalaciones para la eliminación del CO<sub>2</sub>. La inclinación de las tuberías previas a la trampa de humedad permitirá que el condensado fluya hacia la misma.

Se quiere dimensionar el volumen que debe tener la trampa de humedad para una frecuencia de vaciado de al menos una vez por día. Para el cálculo se empleará la ecuación 41. Se consideran el contenido de humedad del biogás como el del aire y las densidades mostradas en la Tabla 35.

$$V_{H_2O} = \frac{V_{\text{biogás,día}}}{t_{\text{sep,oct,nov,dic}}} \cdot \rho_{\text{biogás}} \cdot \text{Humedad}_{\text{sat,aire}} \cdot \frac{1 \text{ kg}_{H_2O}}{1000 \text{ g}_{H_2O}} \quad (\text{Ecuación 41})$$

$$\rho_{H_2O}$$

donde,

$V_{H_2O}$  es el volumen de agua recogida diaria, en m<sup>3</sup>,

$V_{\text{biogás,día}}$  es el volumen de biogás diario que fluye por la tubería, en m<sup>3</sup>,

$t_{\text{sep,oct,nov,dic}}$  es el número de días de septiembre, octubre, noviembre y diciembre,

$\rho_{\text{biogás}}$  es la densidad del biogás, en kg/m<sup>3</sup>,

$\text{Humedad}_{\text{sat,aire}}$  es la humedad de saturación del aire, en g/kg y

$\rho_{H_2O}$  es la densidad del agua líquida, en kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 35.** Densidad de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y biogás y humedad de saturación del aire a 35 °C [62, 105, 106].

Temperatura	Densidad CH <sub>4</sub>	Densidad CO <sub>2</sub>	Densidad biogás (61,7% CH <sub>4</sub> )	Densidad H <sub>2</sub> O	Humedad sat. aire
35 °C	0,65 kg/m <sup>3</sup>	1,74 kg/m <sup>3</sup>	1,06 kg/m <sup>3</sup>	994,3 kg/m <sup>3</sup>	36,7 gH <sub>2</sub> O/kg <sub>aire</sub>

El resultado de la ecuación 41 sustituyendo los datos recogidos anteriormente es:

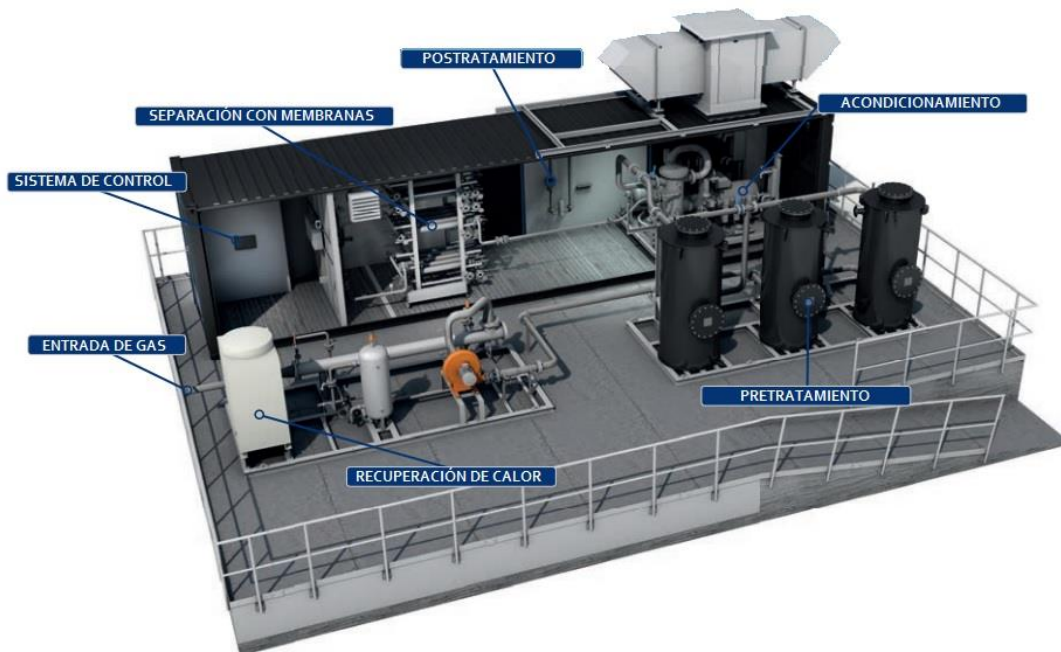
$$V_{H_2O} = \frac{68.389 \text{ m}^3_{\text{biogás}}}{122 \text{ días}} \cdot \frac{1,06 \text{ kg}_{\text{biogás}}}{\text{m}^3_{\text{biogás}}} \cdot \frac{36,7 \text{ g}_{H_2O}}{\text{kg}_{\text{aire}}} \cdot \frac{1 \text{ kg}_{H_2O}}{1000 \text{ g}_{H_2O}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3_{H_2O}}{994,3 \text{ kg}_{H_2O}}$$

$$\cdot \frac{1000 \text{ L}_{H_2O}}{1 \text{ m}^3_{H_2O}} = 21,93 \text{ L}_{H_2O}/\text{día}$$

### 6.4.2.2. Eliminación del CO<sub>2</sub>

El método elegido para la eliminación del CO<sub>2</sub> del biogás consiste en el filtrado a alta presión mediante membranas. Esta opción permite diseños compactos, bajos requerimientos energéticos, fácil operación y mantenimiento y un biometano de pureza de CH<sub>4</sub> cercana al 96%.

Se ha seleccionado la tecnología de la empresa Bright Biomethane [180], expuesta en la Figura 57, consistente en un sistema de membranas en 3 fases capaz de procesar entre 40 y 5.000 Nm<sup>3</sup>/h de biogás por lo que es adecuado tanto para pequeñas como grandes industrias. El consumo energético de la instalación para la eliminación del CO<sub>2</sub> se sitúa en 0,22 kWh/Nm<sup>3</sup>.



**Figura 57.** Ejemplo de instalación de eliminación de CO<sub>2</sub> mediante tecnología de la empresa Bright Biomethane [180].

A la hora de dimensionar la instalación hay que tener en cuenta el volumen de biogás generado por hora. Considerando que el biogás se obtendrá durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, es decir, 122 días, se ha calculado en la Ecuación 42 dicho volumen por hora.

$$V_{\text{biogás,hora}} = \frac{68.389 \text{ Nm}^3}{122 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 23,36 \text{ Nm}^3/\text{h} \quad (\text{Ecuación 42})$$

En consecuencia, es suficiente con la instalación de eliminación de CO<sub>2</sub> mediante membranas de menor capacidad, 40 Nm<sup>3</sup>/h.

A continuación, se quiere cuantificar el volumen de biometano generado anualmente. En base a la simplificación de los cálculos, se ha considerado el biogás, en apartados previos, como una mezcla compuesta únicamente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, con un porcentaje en volumen del 61,7% y 38,3%, respectivamente.

En base a las especificaciones de esta instalación, se prevé una pureza final del biometano del 96% de CH<sub>4</sub> por lo que el volumen final del mismo se calcula mediante en la Ecuación 43.

$$V_{\text{biometano}} = \frac{0,617 \cdot 68.389 \text{ Nm}^3}{0,96} = 43.954,2 \text{ Nm}^3 \quad (\text{Ecuación 43})$$

Se colocará en la conducción posterior a esta instalación un caudalímetro idéntico al existente en la salida de biogás del digestor anaerobio para la medición del caudal de biometano producido y su contenido en CH<sub>4</sub>.

### 6.4.3. CONSUMO

Se quiere evaluar en términos porcentuales, el alcance previsto del ahorro energético de la bodega, sin entrar en valoraciones respecto a su rentabilidad económica. Sin embargo, antes se deben conocer las necesidades energéticas y establecer el modo en que el biometano va a ser utilizado.

Se ha visto en el apartado 1.2.3.3. que, aproximadamente, el 92% del consumo energético de una bodega es de tipo eléctrico y que en aquellas de tamaño pequeño supone de media unos 158.148 kWh. En la Tabla 36 se muestran datos representativos del consumo medio mensual de una bodega de tamaño pequeño que se han obtenido a partir de los datos de un estudio de Cooperativas Agroalimentarias de Aragón que auditó a 20 bodegas de diferentes tamaños y diferentes comunidades autónomas [55].

**Tabla 36.** Consumo mensual de electricidad en la bodega, instalaciones de postratamiento y total [55].

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
<b>Porcentaje (%)</b>	5,90	5,51	5,38	4,72	4,43	4,56	5,52	10,05	20,19	20,22	7,53	5,99
<b>Consumo bodega (kWh)</b>	9.331	8.714	8.508	7.465	7.006	7.212	8.730	15.894	31.930	31.978	11.909	9.473
<b>Consumo instal. postrat. (kWh)</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	3.700	3.823	3.700	3.823
<b>Consumo eléctrico total (kWh)</b>	9.331	8.714	8.508	7.465	7.006	7.212	8.730	15.894	35.630	35.801	15.609	13.296

Los datos del consumo de las instalaciones de postratamiento se han calculado mediante la ecuación 44.

$$\text{Consumo}_{i,p.} = V_{\text{biogás,año}} \cdot \frac{t_{\text{mes}}}{t_{\text{sep,oct,nov,dic}}} \cdot 0,22 \text{ kWh/Nm}^3 \quad (\text{Ecuación 44})$$

donde,

$\text{Consumo}_{i,p.}$  es el consumo mensual de las instalaciones de postratamiento, en kWh,

$V_{\text{biogás,año}}$  es el volumen de biogás generado anualmente, en  $\text{Nm}^3$  y

$T_{\text{mes}}$  es el número de días del mes considerado.

Los meses con mayor demanda eléctrica corresponden a septiembre y octubre, con un consumo eléctrico de 35.630 y 35.801 kWh, correspondientes a una potencia eléctrica de 49,49 y 48,12 kW, respectivamente (véase ecuaciones 45 y 46). En la medida de lo posible, se deberá dimensionar el equipo generador de energía eléctrica a la mayor de dichas demandas, es decir, a la de septiembre.

$$P_{\text{sep}} = \frac{35.630 \text{ kWh}}{30 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 49,49 \text{ kW} \quad (\text{Ecuación 45})$$

$$P_{\text{oct}} = \frac{35.801 \text{ kWh}}{31 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 48,12 \text{ kW} \quad (\text{Ecuación 46})$$

Debido a que el objetivo prioritario será la generación de electricidad, las opciones de uso del biometano se limitan prácticamente a turbinas, microturbinas y motores de combustión. Las primeras quedan descartadas, ya que su uso está enfocado a grandes instalaciones con potencias desde 5 MW. Entre las otras posibilidades, se opta por el empleo de un motor de combustión por los siguientes motivos:

- Uso extendido para la generación eléctrica en instalaciones de biogás.
- Adecuado para potencias pequeñas, a partir de 30 kW.
- Mayor rendimiento eléctrico frente a las microturbinas.
- Mayor tolerancia ante compuestos problemáticos.
- Permiten una mayor compacidad por lo que ocupan menos espacio.

Además, debido a que tanto el digestor anaerobio como la propia bodega tienen requerimientos térmicos, el motor de combustión estará englobado dentro de un equipo de cogeneración.

Recapitulando, los requisitos eléctricos y térmicos se han tasado, en el apartado 6.3.3. y en éste, en 49,49 y 100,15 kW, respectivamente. En base a estos datos se ha optado por un equipo compacto de microcogeneración de la marca Senergie, modelo G 6.12 TI [181], que cuenta con las características mostradas en la Tabla 37.

**Tabla 37.** Especificaciones del equipo de microgeneración Senergie G 6.12 TI [181].

P eléctrica (kW)	η eléctrico (%)	P térmica (kW)	η térmico (%)	P biometano (kW)	η total (%)	Presión (mbar)
80	34,8	123	53,5	230	88,3 %	20-50

Una vez seleccionado el equipo de microgeneración y conociendo su rendimiento eléctrico, ya se puede determinar el consumo mensual de biometano para satisfacer las necesidades eléctricas tanto de la bodega como de las instalaciones de postratamiento (véase Tabla 38), a partir de las ecuaciones 47 y 48.

$$C_{\text{biometano,kWh}} = \frac{C_{\text{eléctrico,kWh}}}{\eta_{\text{eléctrico}}} \quad (\text{Ecuación 47})$$

$$C_{\text{biometano,m}^3} = \frac{C_{\text{biometano,kWh}}}{\text{Pureza}_{\text{biometano}} \cdot \text{PCS}_{\text{vol}}^{\text{CH}_4}} \cdot \frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \quad (\text{Ecuación 48})$$

**Tabla 38.** Datos de consumo eléctrico total, en kWh, y de consumo y producción de biometano, en m<sup>3</sup> y kWh [55].

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Consumo eléctrico total (kWh)	9.331	8.714	8.508	7.465	7.006	7.212	8.730	15.894	35.630	35.801	15.609	13.296
Consumo de biometano (kWh)	26.813	25.040	24.448	21.451	20.132	20.724	25.086	45.672	102.385	102.876	44.853	38.207
Consumo de biometano (m <sup>3</sup> )	2.736	2.555	2.495	2.189	2.054	2.115	2.560	4.661	10.448	10.498	4.577	3.899
Producción de biometano (m <sup>3</sup> )	0	0	0	0	0	0	0	0	10.808	11.169	10.808	11.169
Diferencia Cons./Prod. de biometano (m <sup>3</sup> )	-2.736	-2.555	-2.495	-2.189	-2.054	-2.115	-2.560	-4.661	360	671	6.231	7.270

Realizando el balance entre la producción y el consumo de biometano que existe a lo largo del año, según la ecuación 49, se puede establecer la capacidad de autoconsumo.

$$\text{Capacidad autoconsumo} = \frac{\sum \text{Producción}_{\text{biometano}}}{\sum \text{Consumo}_{\text{biometano}}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 49})$$

Operando en la ecuación anterior:

$$\text{Capacidad autoconsumo} = \frac{43.954 \text{ m}^3}{50.787 \text{ m}^3} \cdot 100 = 86,55 \%$$



#### 6.4.4. ALMACENAMIENTO

Debido a que todo el biometano es generado solamente durante 4 meses y su consumo se realiza durante todo el año y de manera variable es necesario almacenar el volumen no aprovechado (véase Tabla 39).

**Tabla 39.** Diferencia entre el consumo y la producción de biometano y su acumulación.

	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.
<b>Diferencia Cons./Prod. de biometano (m<sup>3</sup>)</b>	360	671	6.231	7.270	-2.736	-2.555	-2.495	-2.189	-2.054	-2.115	-2.560	-4.661
<b>Acumulación de biometano (m<sup>3</sup>)</b>	360	1.031	7.262	14.532	11.796	9.241	6.746	4.557	2.503	388	0	0

El mes con la mayor acumulación de biometano corresponde a diciembre con un volumen de 14.532 m<sup>3</sup>, por lo que se dimensionará el almacenaje en base a este dato.

Visto que se trata de un volumen muy elevado, se opta por depósitos a presión, que permitirá reducir su volumen de almacenamiento. El biometano acumulado se almacenará en 3 depósitos cilíndricos horizontales de longitud 13 m y radio 4 m, de construcción metálica y que mantendrán el gas a una presión de 8 bar. La Tabla 40 muestra los valores de presión, el volumen del biometano a dichas presiones, así como el volumen unitario y total de los depósitos.

**Tabla 40.** Presiones y volúmenes del depósito y del biometano.

Presión atmosférica	Volumen a la presión atmosférica	Presión del depósito	Volumen a la presión del depósito	Volumen del depósito	Número de depósitos	Volumen máximo de almacenado
1,01325 bar	14.532 m <sup>3</sup>	8 bar	1.841 m <sup>3</sup>	653 m <sup>3</sup>	3	1.960 m <sup>3</sup>

El biometano será comprimido desde la presión ambiental hasta los 8 bar necesarios para su introducción en los depósitos, mediante el compresor de pistón que se visualiza en la Figura 58 de la marca Josef Mehrer GmbH & Co KG, modelo TEL 80/S3-15-F con una potencia de 15 kW y un flujo máximo de 65 m<sup>3</sup>/h [182].



**Figura 58.** Compresor de pistón Josef Mehrer GmbH & Co KG, modelo TEL 30/S3-15-F utilizado para la compresión de biometano [182].

## 6.5. GESTIÓN DEL DIGERIDO

Una vez la digestión anaerobia ha llegado a su fin y se ha recogido el biogás, dentro del mismo queda un material semisólido con un contenido elevado de nutrientes tales como nitrógeno, fósforo y potasio que resulta de interés como fertilizante y mejorador de suelos.

Tal como se ha comentado en el apartado 5.2., el digerido se produce en un volumen similar al del sustrato de alimentación. Por lo tanto, se espera un volumen que se determina mediante la ecuación 50.

$$V_{\text{dig}} = V_s = \frac{m_s}{\rho_s} \quad (\text{Ecuación 50})$$

donde,

$V_{\text{dig}}$  es el volumen del digerido, en  $\text{m}^3$ ,

$V_s$  es el volumen del sustrato M3ip, en  $\text{m}^3$  y

$\rho_s$  es la densidad del sustrato M3ip, en  $\text{kg}/\text{m}^3$ , dado en la Tabla 30.

El resultado de la ecuación 48 da un valor para  $V_{\text{dig}}$  de:

$$V_{\text{dig}} = V_s = \frac{440.000 \text{ kg}}{1.240 \text{ kg}/\text{m}^3} = 354,8 \text{ m}^3$$

Esto supone un volumen de digerido por cada ciclo de digestión anaerobio de 177,4  $\text{m}^3$ .

### 6.5.1. Almacenamiento y separación sólido-líquido

En este caso no se realizará una separación de fases al uso, es decir, el digerido no pasará por equipo alguno para su filtrado o prensado dando lugar a una fracción sólida y otra líquida. Dado que éste ya contiene un elevado porcentaje de materia seca, debido a las características iniciales del sustrato, bastará con disponer el digerido sobre una superficie diseñada a fin de separar únicamente los lixiviados que se generen.

Con el fin de que no exceder ninguna de las medidas de ancho y largo, dicha superficie será de planta cuadrada y constará de dos balsas de dimensiones 12 m de largo, 6 m de ancho y 2,5 m de profundidad, que estarán cubiertas en su totalidad por una estructura, que evitará la caída de agua de lluvia sobre el digerido y abierta en sus laterales para permitir su aireación. Cada una permitirá almacenar completamente el volumen de digerido de un digestor. Tendrán un revestimiento de material impermeable que impida la filtración de los lixiviados, que se recogerán debido a la inclinación de las balsas en un pozo dispuesto en uno de sus vértices contiguos.

### 6.5.2. Compostaje

Una vez depositado el digerido en las balsas, se procederá a su compostaje. Se procurará:

- Una humedad del digerido entre el 40 y 60% mediante la adición de agua de red en caso que el propio digerido no posea la suficiente. No se añadirán nunca los lixiviados, que se utilizarán para otro propósito.
- Una aireación adecuada, para lo cual se volteará el digerido manualmente.
- Introducir el material estructurante suficiente para ajustar el valor de C/N a valores cercanos a 25. Los digeridos anaerobios suelen tener valores entre 10 y 20. Se emplearán restos de poda, como sarmientos, debidamente triturados.

El compost obtenido se empleará como mejorador de suelos en los viñedos pertenecientes a la bodega. Si resulta en exceso, se consideraría su venta, siempre y cuando cumpla con los requisitos para su comercialización.

### 6.5.3. Gestión del lixiviado

El lixiviado recogido de las balsas de digerido se almacenará en depósitos para su utilización como inóculo en futuras digestiones anaerobias y reducir la utilización del suministrado por la E.D.A.R. de Logroño. El motivo de esto responde a que es más recomendable emplear inóculos procedentes de digestiones anaerobias de sustratos similares a los que se van a digerir.

## 7. CONCLUSIONES

---

Tras la realización de este proyecto, se ha comprobado que la digestión anaerobia se constituye como uno de los procesos más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero y el aprovechamiento energético y fertilizante de los residuos de vinificación (raspón, orujo y lías).

En un principio, la caracterización de estos residuos ha permitido evaluar diferentes mezclas de ellos y seleccionar la más adecuada. Sin embargo, esta mezcla aún presentaba aspectos que requerían un pretratamiento para ajustarse a las condiciones óptimas para la digestión anaerobia. Ello ha supuesto, adicionar a la mezcla tres aditivos para ajustar los valores de pH, alcalinidad y fósforo, los cuales han sido NaOH, NaHCO<sub>3</sub> y SPT, respectivamente. A pesar de ello, los residuos iniciales se han postulado como un buen material para la digestión anaerobia, en especial, debido a su reducida cantidad de elementos problemáticos, tales como azufre y metales pesados.

A consecuencia de la baja concentración de elementos problemáticos y la elección de un digester discontinuo, motivada por la generación discontinua en el tiempo de los residuos, ha posibilitado simplificar la operativa y realizar todo el pretratamiento y la digestión anaerobia en un mismo lugar reduciendo el espacio utilizado. No obstante, esta elección ha conllevado la necesidad de emplear un 10% de inóculo con alta actividad metanogénica para acelerar el arranque del digester en cada nuevo ciclo, debido a que los microorganismos anaerobios son retirados junto con el digerido al finalizar el proceso. En cualquier caso, la obtención de un inóculo no ha supuesto un problema importante ya que existe amplia disponibilidad de lodos de E.D.A.R. en la cercanía, concretamente en Logroño, que muestran las condiciones adecuadas para tal uso.

En cuanto al dimensionamiento del digester, se ha tenido en cuenta el volumen de residuos generados anualmente, que se ha calculado en 400.000 kg, y se ha optado por realizar su digestión en dos ciclos de 200.000 kg en un digester de 200 m<sup>3</sup>. Ello ha permitido, por un lado, que el almacenamiento de los residuos no se prolongue demasiado y, por el otro, que la generación de biogás se produzca durante un mayor tiempo que posibilita un consumo más gradual y evita una acumulación excesiva. El calentamiento del sustrato hasta la temperatura de operación, fijada en 35 °C se realiza mediante una conducción en el interior del digester por la que circula agua caliente, con un salto de 30 °C entre la entrada y la salida, logrando el intercambio de calor de una forma simple y eficaz. Se han calculado tanto las necesidades térmicas para elevar la temperatura del sustrato desde la temperatura ambiental hasta la de operación como las pérdidas caloríficas hacia el exterior. El aporte de calor está garantizado mediante el equipo de cogeneración encargado del aprovechamiento energético del biogás.

Durante el proceso de digestión anaerobia, propiamente dicho, se ha incidido sobre el control de 3 parámetros, que se han considerado los más importantes: temperatura, pH y alcalinidad. Para las dos primeras ha bastado con la instalación de sensores que muestran los valores de forma telemática, permitiendo la agregación de NaOH mediante una bomba dosificadora cuando el pH baje de 6,8 y la activación del sistema de calefacción cuando la temperatura baje de 33 °C. Sin embargo, el control de la alcalinidad supone la toma de muestras y su análisis en laboratorio 3 veces por semana. A pesar de ser una tarea algo laboriosa, el análisis periódico de la alcalinidad se ha considerado más importante que el del pH, debido a que previene ante variaciones de éste. En resumen, el control de la alcalinidad es un sistema preventivo mientras que el del pH es correctivo.

Una vez concluida la digestión anaerobia, se han obtenido dos subproductos: biogás y digerido. Debido a que la generación del biogás se produce durante aproximadamente los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, éste no puede ser consumido a medida que se genera y ha sido necesario su almacenamiento en 3 depósitos a presión de 8 bar inmediatamente después de su conversión en biometano mediante la eliminación de la humedad y el CO<sub>2</sub>. Su consumo se realiza en un equipo de cogeneración que produce hasta el 86 % del consumo eléctrico anual de la bodega y, además, abastece el sistema de calefacción del digestor así como algunos de los requerimientos térmicos de la bodega, como la climatización o el agua caliente sanitaria de las oficinas.

Por último, el digerido ha sido destinado a una balsa impermeabilizada y cubierta que permite la recogida de los lixiviados para su utilización en posteriores digestiones anaerobias como inóculo. El resto es compostado logrando su estabilización para su utilización en los viñedos de la propia bodega como aporte de nutrientes y mejorador del suelo.

En conclusión, lo anterior demuestra que el proyecto, al margen de los aspectos económicos, puede ser aplicable a bodegas de tamaño pequeño.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] WESTRA, M. T. y KUYVENHOVEN, S. *Energía: impulsando el mundo*. Múnich: Bavaria Druck, 2007.
- [2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2010*. París: IEA Publications, 2010. ISBN 978-92-64-08624-1.
- [3] HUBBERT, M. K. *Nuclear energy and the fossils fuels*. San Antonio: American Petroleum Institute, 1956.
- [4] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2017. Resumen ejecutivo. Spanish translation*. París: IEA Publications, 2017.
- [5] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2018 (Data)* [en línea]. [Consultado 17 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.iea.org/weo/weo2018/secure/>
- [6] INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. *Energía de la biomasa*. Madrid: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2007.
- [7] Unión Europea. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 5 de junio de 2009.
- [8] Unión Europea. Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo, relativa al vertido de residuos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 14 de junio de 2018.
- [9] Unión Europea. Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo, sobre los residuos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 14 de junio de 2018.
- [10] INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio técnico PER 2011-2020*. Madrid: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2011.
- [11] España. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. *Boletín Oficial del Estado*, 29 de julio, núm. 181.
- [12] ESCOBAR PALACIO, J. C., et al. Capítulo 8. Generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos. En: RINCÓN MARTÍNEZ, J. M. y SILVA LORA, E. E. *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. Bogotá: Red Iberoamericana de Energía, 2015. ISBN 978-958-58880-0-5.

- [13] MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA. *Valorización energética/Tratamientos térmicos* [en línea]. [Consultado 17 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Pirolisis.aspx>
- [14] NAVARRO CINTAS, E. *Análisis del proceso de síntesis de gas natural de sustitución (SNG) a partir de biomasa* [en línea]. Trabajo fin de grado. Universidad de Sevilla, 2014. [Consultado 17 septiembre 2019]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90124/fichero/TFG.An%C3%A1lisis+del+proceso+de+s%C3%ADntesis+de+gas+natural+de+sustituci%C3%B3n+%28SNG+%29+a+partir+de+biomasa..pdf>
- [15] VALDERRAMA, J. O. *Información Tecnológica – Vol. 5 N<sup>o</sup> 2*. La Serena: Centro de Información Tecnológica, 1994. ISSN 0716-8756.
- [16] ELÍAS, X. *Reciclaje de residuos industriales: Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*. Madrid: Díaz de Santos, 2009. ISBN 978-84-7978-835-3.
- [17] TEJADA TOVAR, C., et al. Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. *Revista Luna Azul*, 2013, No. 36, 10-25. ISSN 1909-2474.
- [18] MEDINA VILLADIEGO, M., et al. Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiesel. *Revista Luna Azul*, 2015, No. 40, 25-34. ISSN 1909-2474.
- [19] ROMÁN, P., et al. *Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina*. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2013. ISBN 978-92-5-307844-8.
- [20] VARNERO MORENO, M. T. *Manual de Biogás*. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2011. ISBN 978-95-306892-0.
- [21] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE LA VIÑA Y EL VINO. *Comunicado de prensa: Los datos de la coyuntura vitivinícola mundial* [en línea]. París: Organización de la Viña y el Vino, 2018. [Consultado 18 septiembre 2019]. Disponible en: <http://www.oiv.int/public/medias/6305/oiv-comunicado-de-prensa-los-datos-de-la-coyuntura-vitivin-c.pdf>
- [22] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE LA VIÑA Y EL VINO. *Aspectos de la coyuntura mundial* [en línea]. París: Organización de la Viña y el Vino, 2018. [Consultado 19 septiembre 2019]. Disponible en:



<http://www.oiv.int/public/medias/5960/aspectos-de-la-coyuntura-mundial-oiv-abril-2018.pdf>

[23] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE LA VIÑA Y EL VINO. *Estadísticas* [en línea]. [Consultado 19 septiembre 2019]. Disponible en: <http://www.oiv.int/es/statistiques/>

[24] DENOMINACIÓN DE ORIGEN CALIFICADA RIOJA. *Zona de producción* [en línea]. [Consultado 19 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.riojawine.com/es-es/zona-de-produccion/>

[25] DECÁNTALO. *Las Subzonas de la D.O.Ca. Rioja* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.decantalo.com/es/blog/denominaciones-de-origen/rioja/las-subzonas-la-d-ca-rioja/>

[26] DENOMINACIÓN DE ORIGEN CALIFICADA RIOJA. *Variedades de uva* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.riojawine.com/es-es/el-rioja/variedades-de-uva/>

[27] DENOMINACIÓN DE ORIGEN CALIFICADA RIOJA. *Tipos de vino* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.riojawine.com/es-es/el-rioja/tipos-de-vino/>

[28] España. Orden APA/3465/2004, de 20 de octubre, por la que se aprueba el Reglamento de la Denominación de Origen Calificada Rioja y de su Consejo Regulador. *Boletín Oficial del Estado*, 27 de octubre, núm. 259.

[29] DENOMINACIÓN DE ORIGEN CALIFICADA RIOJA. *Circular 5/2007. Cambios en Pliego de Condiciones para Reserva, Gran Reserva y Blancos* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.riojawine.com/es-es/consejo-regulador-doca-rioja/legislacion/normativas/circular-5-2017/>

[30] INTEREMPRESAS. *El vino de Rioja en los mercados* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Vitivinicola/Articulos/217350-El-vino-de-Rioja-en-los-mercados.html>

[31] DENOMINACIÓN DE ORIGEN CALIFICADA RIOJA. *Pliego de Condiciones* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.riojawine.com/es-es/consejo-regulador-doca-rioja/legislacion/pliego-de-condiciones/>

[32] URBINA VINOS. *Vendimia manual o mecánica y transporte de la uva* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://urbinavinos.blogspot.com/2015/07/vendimia-manual-o-mecanica-y-transporte.html>

[33] BODEGAS VIVANCO. *¿Cómo es el proceso de elaboración del vino tinto?* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://vivancoculturadevino.es/blog/2016/06/14/proceso-de-elaboracion-del-vino-tinto/>

[34] VINOS DIFERENTES. *¿Qué es un vino de maceración carbónica?* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://vinosdiferentes.com/maceracion-carbonica/>

[35] URBINA VINOS. *Cómo hacer vinos de maceración carbónica* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://urbinavinos.blogspot.com/2012/04/como-hacer-vinos-de-maceracion.html>

[36] VINETUR. *¿Qué son los vinos de maceración carbónica?* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.vinetur.com/2018011845968/que-son-los-vinos-de-maceracion-carbonica.html>

[37] URBINA VINOS. *Estrujado y despalillado de los racimos de uva* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://urbinavinos.blogspot.com/2013/10/estrujado-y-despalillado-de-los-racimos.html>

[38] URBINA VINOS. *¿Qué es el trasiego de un vino?* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://urbinavinos.blogspot.com/2012/04/trasiego-del-vino.html>

[39] URBINA VINOS. *Clarificación del vino* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://urbinavinos.blogspot.com/2011/07/clarificacion-del-vino-19.html>

[40] BODEGAS VIVANCO. *¿Cómo es el proceso de elaboración del vino blanco y rosado?* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://vivancoculturadevino.es/blog/2016/08/09/proceso-elaboracion-vino-blanco-y-rosado/>

[41] URBINA VINOS. *Tipos, clasificación y categorías de los vinos de Rioja* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en:

<http://urbinavinos.blogspot.com/2017/02/tipos-clasificacion-y-categorias-de-los.html>

[42] DIARIO LA RIOJA. *El acecho a los excedentes incendia el final de la vendimia con millones de kilos de uva en el suelo* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.larioja.com/la-rioja/201610/21/acecho-excedentes-incendia-final-20161021004103-v.html>

[43] GARCIA CAZORLA, J. y XIRAU VAYREDA, M. *Manual de Técnicas usuales de análisis en enología*. Barcelona: Panreac Química, 2000.

[44] URBINA VINOS. *Conducción de la fermentación alcohólica en el vino* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://urbinavinos.blogspot.com/2017/02/conduccion-de-la-fermentacion.html>

[45] DENOMINACIÓN DE ORIGEN CALIFICADA RIOJA. *Memoria Anual 2018* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.riojawine.com/wp-content/uploads/1/2019/05/memoria\\_2018\\_digital.pdf](https://www.riojawine.com/wp-content/uploads/1/2019/05/memoria_2018_digital.pdf)

[46] URBINA VINOS. *¿Qué es el raspón o escobajo del racimo de uvas?* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://urbinavinos.blogspot.com/2011/12/que-es-el-raspon-o-escobajo-del-racimo.html>

[47] CARMONA JIMÉNEZ, Y. *Caracterización de subproductos de la industria vitivinícola y su aplicación en cosmética* [en línea]. Tesis doctoral. Universidad de Cádiz, 2015. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/19081/TESIS.pdf>

[48] GUITERAS FARRÁS, J. *Valoración y aprovechamiento de algunos subproductos y residuos* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/10975/299-313.pdf>

[49] HIDALGO TOGORES, J. *Tratado de Enología I*. Madrid: Mundi-Prensa, 2011. ISBN 978-84-8475-415-1

[50] PROYECTO LIFE SINERGIA. *Impactos ambientales en bodega* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://studylib.es/doc/5039059/impactos-ambientales-en-bodega---presentaci%C3%B3n-proyecto-life>

[51] MAOCHO, F. *El “tufo” de la fermentación un riesgo mortal en las bodegas* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en:

<https://felixmaocho.wordpress.com/2014/10/07/el-tufo-de-la-fermentacion-un-riesgo-mortal-en-las-bodegas/>

[52] URBINA VINOS. *Metabisulfito Potásico (SO<sub>2</sub>) – Composición, dosis y modo de empleo* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://urbinavinos.blogspot.com/2013/10/metabisulfito-potasico-so2-composicion.html>

[53] PALACIOS, A., BORINAGA, I. y CASTILLO, D. *Estudio comparativo de sistemas de desinfección de barricas de vino como alternativas al empleo de sulfuroso* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: [http://www.revistaenologos.es/download.php?type=doc&name=A17\\_LimpiezadeBarricas\\_Enlogos2012\\_x.pdf](http://www.revistaenologos.es/download.php?type=doc&name=A17_LimpiezadeBarricas_Enlogos2012_x.pdf)

[54] RUIZ FUENTES, J. A. *Caracterización del consumo de una bodega* [en línea]. Trabajo fin de estudios. Universidad de La Rioja, 2012. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/TFE000097.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/TFE000097.pdf)

[55] COOPERATIVAS AGRO-ALIMENTARIAS. *Manual de ahorro y eficiencia energética del sector. Bodegas* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.agro-alimentarias.coop/ficheros/doc/03200.pdf>

[56] TESLA. *Manual de eficiencia energética en bodegas* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://teslaproject.chil.me/download-doc/63911>

[57] AURA ENERGÍA. *Tarifas Luz Industria Península* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.aura-energia.com/tarifas-luz-industria-peninsula/>

[58] NINOBE ENERGÍA. *Tarifas alta tensión* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://ninobe.com/alta-tension/>

[59] NATURGY. *Plan ahorro electricidad* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.naturgy.es/tarifa fija electricidad>

[60] IBERDROLA. *Tarifas electricidad* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.iberdrola.es/empresas/informacion/mercado-energetico>

[61] GOBIERNO DE LA RIOJA. *Superficies ocupadas por los cultivos agrícolas. Año agrícola 2018* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.larioja.org/agricultura/es/estadistica-agraria/fichas-municipales/rioja-2018.ficheros/1163128-La%20Rioja%202018.pdf>

- [62] FERNÁNDEZ GARCÍA, L. *Selección y dimensionado de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines codigeridos con glicerina* [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad de Cádiz, 2016. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/18784/b37451868.pdf>
- [63] CAMPOS, E., ELÍAS, X. y FLOTATS, X. Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. En: ELÍAS CASTELLS, X. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Díaz de Santos, 2005. ISBN 978-84-7978-694-6
- [64] SOLERA DEL RÍO, R. et al. *Aspectos biológicos de la digestión anaerobia II.2*. Madrid: Mundi-Prensa, 2015. ISBN 978-84-8476-700-8
- [65] VEEKEN, A. y HAMELERS, B. Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components [en línea]. *Bioresource technology*, 1999, No. 69, 249-254. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852498001886>
- [66] GRUPO BIOTAR. *Rediseño de la EDAR de Utrera con mayor eficiencia energética. Aplicación de co-digestión* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: [http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/15829/mod\\_resource/content/0/Anexo%203.%20Proceso%20de%20digestio%CC%81n%20anaerobia..pdf](http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/15829/mod_resource/content/0/Anexo%203.%20Proceso%20de%20digestio%CC%81n%20anaerobia..pdf)
- [67] COSTANZA CORRALES, L. et al. Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta [en línea]. *Nova*, 2015, No. 13, 55-81. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>
- [68] LORENZO ACOSTA, Y. y OBAYA ABREU, M. C. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *Revista ICIDCA*, 2005, No. 1, 35-48. ISSN 0138-6204
- [69] GUNNERSON, C. y STUCKEY, D. *Anaerobic digestion. Principles and practices for Biogas Systems*. Washington D.C.: The World Bank, 1986. ISBN 0-8213-0752-5
- [70] MORALES ROJO, P. M. *Digestión anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas y su aprovechamiento* [en línea]. Tesis doctoral. Universidad de las Américas, 2005. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leia/morales\\_r\\_pm/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/morales_r_pm/)
- [71] JAYARAJ, S. et al. *Study on the effect of pH on biogas production from food waste by anaerobic digestion* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/264545493>

- [72] SERRANO MORAL, A. *Tratamiento de residuos y subproductos agroindustriales mediante codigestión anaerobia* [en línea]. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba, 2015. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/12558/2015000001095.pdf>
- [73] YENIGÜN, O. y DEMIREL, B. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. [en línea]. *Process biochemistry*, 2013, No. 48, 901-911. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511313001657>
- [74] YENIGÜN, O. y DEMIREL, B. Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables [en línea]. *Ingeniería y competitividad*, 2008, No. 2, 41-52. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/263729478>
- [75] KHANAL, S. K. *Anaerobic biotechnology for bioenergy production. Principles and applications*. Iowa, Blackwell Publishing, 2008. ISBN 978-0-8138-2346-1
- [76] NOGUÉS, F. S. *Energía de la biomasa (Vol. II): Energías renovables*. Zaragoza, Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2010. ISBN 978-84-1503-101-7
- [77] DÍAZ BÁEZ, M. C. *Digestión anaerobia: Una aproximación a la tecnología*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 2002. ISBN 978-95-8701-196-8
- [78] WILLS, B. y NARANJO, F. Evaluación del efecto tóxico del acetato plomo y el cloruro de cromo sobre el metabolismo bacteriano anaerobio. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquía*, 2004, No. 32, 17-25. ISSN 0120-6230
- [79] NÚÑEZ-PINTADO, L. *Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales* [en línea]. Tesis de maestría. Universidad de Piura, 2017. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2986/MAS\\_IME\\_AUT\\_016.pdf](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2986/MAS_IME_AUT_016.pdf)
- [80] LI, Y. et al. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste [en línea]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2011, No. 15, 821-826. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110002224>
- [81] RAJESHWARI, K. V. et al. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment [en línea]. *Renewable and sustainable energy*



reviews, 2000, No. 4, 135-156. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032199000143>

[82] VALENZUELA, R. A. *Bioprecipitación de cobre por sulfato-reducción en un reactor de lodos granulares expandidos* [en línea]. Tesis de maestría. Universidad de Sonora, 2011. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/bitstream/handle/unison/318/valenzuelaramonaxelm.pdf>

[83] DÍAZ BROOKS, B. et al. Estado del arte sobre el tratamiento biológico para los residuales de Punta Periquillo II. Digestión anaerobia [en línea]. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 2002, No. 23, 34-38. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd19/collazo/periqui2.pdf>

[84] FERNÁNDEZ, G. et al. Inhibición del proceso anaerobio: compuestos utilizados en porcicultura [en línea]. *Ingeniería Universidad de Yucatán*, 2002, No. 6, 67-71. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen6/inhibidores.pdf>

[85] HENZE, M. y HARREMOËS, P. Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors – A literature review [en línea]. *Progress in energy and combustion science*, 2008, No. 15, 1-101. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/237106670>

[86] APPELS, L. et al. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge [en línea]. *Water science & technology*, 2008, No. 34, 755-781. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128508000312>

[87] FNR. *Guía sobre el biogás. Desde la producción hasta el uso* [en línea]. Gülzow: FNR, 2010. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/l/e/leitfadenbiogas-es-2013.pdf>

[88] FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, J. *Optimización en la digestión anaerobia seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura* [en línea]. Tesis doctoral. Universidad de Cádiz, 2010. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: [https://srvrodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/15833/Tes\\_2011\\_02.pdf](https://srvrodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/15833/Tes_2011_02.pdf)

[89] KOSSMANN, W. et al. *Biogas Digest Volume II* [en línea]. Coburn: GTZ, 1999. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/526>



- [90] PEARSON NI. *Mixers and pumps* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <http://pearson-ni.com/products/energy-saving/>
- [91] AGRIEXPO. *Agitadores* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.agriexpo.online/es/fabricante-agricola/agitador-152.html>
- [92] PETERS AGRARTECHNIK. *Paddelstirer Excentro* [en línea]. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.peters-mixer.com/en/shop/biogas/paddelstirer-excentro->
- [93] SAN MIGUEL, G. y GUTIÉRREZ MARTÍN, F. *Tecnologías para el uso y la transformación de biomasa energética*. Madrid: Mundi-Prensa, 2015. ISBN 978-84-8476-674-2
- [94] GARRIDO MARTÍNEZ, S. *Diseño y estudio de una bomba hidráulica centrífuga mediante la generación de su prototipo virtual* [en línea]. Trabajo fin de máster. Universidad Politécnica de Valencia, 2017. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/78744/04624705A\\_TFM\\_148715\\_80906773394668553266987220.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/78744/04624705A_TFM_148715_80906773394668553266987220.pdf)
- [95] BRITO, H. *Texto básico de mecánica de fluidos* [en línea]. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2006. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/321870744>
- [96] URBINA VINOS. *Operaciones prefermentativas del vino* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://urbanavinos.blogspot.com/2017/01/operaciones-prefermentativas-del-vino.html>
- [97] OFICINA NACIONAL EN EL BRASIL. *Tecnologías para o desenvolvimento sustentável*. Brasilia: UNESCO, 2011. ISBN 978-85-7652-154-9
- [98] MORAGA PAREDES, A. Módulo 1. Introducción [en línea]. En: MORAGA PAREDES, A. *Curso de Formación Especializada en Biogás para Instaladores*. Santiago de Chile: BiogásEnergía.cl, 2017. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2017/11/Biogas-modulo1-Introduccion-11-2017.pdf>
- [99] RODRÍGUEZ SUÁREZ, S. *Tecnologías de biodigestión aplicadas al turismo* [en línea]. Trabajo fin de grado. Universidad de La Laguna, 2015. [Consultado 7 noviembre 2019]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/1390/Tecnologias%20de%20biodigestion%20aplicadas%20al%20turismo.pdf>

- [100] PASCUAL, A. et al. *Situación y potencial de generación de biogás. Estudio técnico PER 2011-2020* [en línea]. Madrid: IDAE, 2011. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_e16\\_biogas\\_db43\\_a675.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43_a675.pdf)
- [101] IDAE. *Biomasa: Digestores anaerobios*. Madrid: IDAE, 2008. ISBN 978-84-96680-21-0
- [102] FLOTATS RIPOLL, X. et al. *Ingeniería y aspectos técnicos de la digestión anaerobia II.4*. Madrid: Mundi-Prensa, 2015. ISBN 978-84-8476-629-2
- [103] GARCÍA-CARO ANDREU, L. *Estudio del comportamiento del tratamiento anaerobio de fangos ante modificaciones en la entrada* [en línea]. Trabajo fin de grado. Universidad Politécnica de Valencia, 2015. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/50162/PFC%20-%20Garc%C3%ADa-Caro%20Andreu%2C%20L..pdf>
- [104] BATERO CORREA, Y. C. y CRUZ OLIVEROS, E. M. *Evaluación de filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFAs) con medio de soporte en guadua para la remoción de materia orgánica de un agua residual sintética* [en línea]. Tesis de grado. Universidad Tecnológica de Pereira, 2007. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/821/6283B328.pdf>
- [105] ÇENGEL, Y. y BOLES, M. *Termodinámica (6a. ed.)*. México D.F.: McGraw-Hill/Interamericana, 2009. ISBN 978-1-4562-0259-0
- [106] ÇENGEL, Y. *Introduction to thermodynamics and heat transfer, Second Edition*. Nueva York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0-390-86122-7
- [107] ARANZABE, E. y CIRIA, J. I. *Siloxanos en motores de gas* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [http://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/Siloxanos\\_motores\\_gas\\_ES.pdf](http://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/Siloxanos_motores_gas_ES.pdf)
- [108] INFOENVIRO. *Efecto de los siloxanos en los motores de biogás* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [http://www.ingenieria-analitica.com/downloads/dl/file/id/1051/product/163/efecto\\_de\\_los\\_siloxanos\\_en\\_los\\_motores\\_de\\_biogas.pdf](http://www.ingenieria-analitica.com/downloads/dl/file/id/1051/product/163/efecto_de_los_siloxanos_en_los_motores_de_biogas.pdf)
- [109] ARELLANO, L. et al. *Purificación y usos del biogás*. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona, 2017. ISBN 978-84-490-6961-1

- [110] DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE. *Report. Biogas and bio-syngas upgrading* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.teknologisk.dk/\\_media/52679\\_Report-Biogas%20and%20syngas%20upgrading.pdf](https://www.teknologisk.dk/_media/52679_Report-Biogas%20and%20syngas%20upgrading.pdf)
- [111] GUTIÉRREZ, A. Capítulo 4. Uso en redes de gas natural [en línea]. En: PROBIOGAS. *Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás*. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [http://213.229.136.11/bases/ainia\\_probiogas.nsf/0/E7335CFC81BF4BC0C125773D002A60C2/\\$FILE/Cap4.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/E7335CFC81BF4BC0C125773D002A60C2/$FILE/Cap4.pdf)
- [112] GUTIÉRREZ, A. Capítulo 6. Microturbinas [en línea]. En: PROBIOGAS. *Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás*. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [http://213.229.136.11/bases/ainia\\_probiogas.nsf/0/EC74A19037C5B611C125773D002A9847/\\$FILE/Cap6.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/EC74A19037C5B611C125773D002A9847/$FILE/Cap6.pdf)
- [113] GUTIÉRREZ, A. Capítulo 2. Motores de cogeneración [en línea]. En: PROBIOGAS. *Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás*. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [http://213.229.136.11/bases/ainia\\_probiogas.nsf/0/F9F832A77BF0CA25C125753F0058C4B2/\\$FILE/Cap2.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/F9F832A77BF0CA25C125753F0058C4B2/$FILE/Cap2.pdf)
- [114] GARCÍA-CARO ANDREU, L. *Producción de hidrógeno a partir de biogás en reactor de lecho fluidizado de dos zonas (TZFBR)* [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad de Zaragoza, 2012. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/8912/files/TAZ-PFC-2012-604.pdf>
- [115] SILVA, M. T. *Planta de producción de hidrógeno a partir de metano* [en línea]. Tesis doctoral. Universidad de Salamanca, 2015. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/319423471>
- [116] PINO PRIEGO, A. *Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de hidrógeno* [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad de Sevilla, 2009. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127>
- [117] ELÍAS, X. y JURADO, L. El hidrógeno y las pilas de combustible. En: ELÍAS CASTELLS, X. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Díaz de Santos, 2005. ISBN 978-84-7978-694-6
- [118] CABRERA, J.A. y AZKÁRATE, G. et al. *Hidrógeno y pilas de combustible. Estudio de prospectiva* [en línea]. Madrid: Fundación OPTI, 2006. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/295919534>

- [119] MIRANDA BARRERAS, A. L. *El hidrógeno. Fundamento de un futuro equilibrado*. Madrid: Díaz de Santos, 2005. ISBN 978-84-7978-681-7
- [120] VIGNART, O. *Petroquímica y energía*. Buenos Aires: Academia Nacional de Ingeniería, 2012.
- [121] RODRÍGUEZ, R. y ECHAVARRIA, M. *Obtención de metanol. Propiedades – Usos* [en línea]. [Consultado 8 noviembre]. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/procesos\\_fisicoquimicos/Obtencion\\_de\\_Metanol.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/procesos_fisicoquimicos/Obtencion_de_Metanol.pdf)
- [122] MÁRQUEZ, R. Capítulo 4. Nitrógeno – Producción de gas de síntesis [en línea]. En: *Guía de Química Industrial II*. [Consultado 8 noviembre]. Disponible en: [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/2009/08/Guia-Quimica-Industrial-II-Amoniaco\\_Acido-Nitrico.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/2009/08/Guia-Quimica-Industrial-II-Amoniaco_Acido-Nitrico.pdf)
- [123] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. *Metanol* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia19.pdf>
- [124] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. *Amoniaco* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia5.pdf>
- [125] BERNAL CALDERÓN, M. P. et al. *Uso agrícola de materiales digeridos: situación actual y perspectivas de futuro III.7*. Madrid: Mundi-Prensa, 2015. ISBN 978-84-8476-691-9
- [126] BERNAL CALDERÓN, M. P. et al. *Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometanización*. Madrid: CSIC, 2011. ISBN 978-84-6941-868-0
- [127] CERDA, A. P. et al. Valorisation of digestate from biowaste through solid-state fermentation to obtain value added bioproducts: a first approach [en línea]. *Bioresource Technology*, 2019, No. 271, 409-416. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [https://ddd.uab.cat/pub/artpub/2019/196258/biotec\\_a2019m1v271p409.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/artpub/2019/196258/biotec_a2019m1v271p409.pdf)
- [128] FANG, W. et al. White rot fungi pretreatment to advance volatile fatty acid production from solid-state fermentation of solid digestate: Efficiency and mechanisms [en línea]. *Energy*, 2018, No. 162, 534-541. [Consultado 8 noviembre

2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218316141>

[129] SALCEDO CÁMARA, A. *Guía para la gestión de bioresiduos* [en línea]. Trabajo fin de grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, 2016. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91032/fichero/Gu%C3%ADa+para+la+gesti%C3%B3n+de+Biorresiduos+TFG+IngQu%C3%ADmica.pdf>

[130] Unión Europea. Reglamento (CE) 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009, por el que se establecen las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 21 de octubre de 2009.

[131] Unión Europea. Reglamento (CE) 208/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de febrero de 2006, por el que se modifican los anexos VI y VIII del Reglamento (CE) 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, en lo que se refiere a las normas de transformación para las plantas de biogás y compostaje y las condiciones aplicables al estiércol. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 7 de febrero de 2006.

[132] RAMOS MARÍN, S. *Biodegradabilidad anaerobia de fracción orgánica de residuo urbano pretratado mediante esterilización* [en línea]. Trabajo fin de grado. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2015. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [http://oa.upm.es/48689/1/TFG\\_SARA\\_RAMOS\\_MARIN.pdf](http://oa.upm.es/48689/1/TFG_SARA_RAMOS_MARIN.pdf)

[133] AKHIAR, A. 2017. *Characterization of liquid fraction of digestates after solid-liquid separation from anaerobic co-digestion plants* [en línea]. Tesis doctoral. Montpellier: Université Montpellier [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01684830/document>

[134] España. Real decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. *Boletín Oficial del Estado*, 8 de diciembre, núm 294.

[135] AGÈNCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA. Anejo 5. Prescripciones técnicas para el desarrollo de infraestructuras [en línea]. En: *Plan territorial sectorial de infraestructuras de gestión de residuos municipales de Cataluña: 2013-2020*. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [http://residus.gencat.cat/web/.content/home/ambits\\_dactuacio/planificacio/pla\\_territorial\\_sectorial\\_dinfraestructures\\_de\\_gestio\\_de\\_residus/pinfrecat20/docs/4\\_5\\_prescripcions\\_tecniques\\_es.pdf](http://residus.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/planificacio/pla_territorial_sectorial_dinfraestructures_de_gestio_de_residus/pinfrecat20/docs/4_5_prescripcions_tecniques_es.pdf)

[136] WILSENACH, J. A. et al. Phosphate and potassium recovery from source separated urine through struvite precipitation [en línea]. *Water Research*, 2007, No. 41, 458-466. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135406005707>

[137] CLAROS BEDOYA, J. A. *Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal* [en línea] Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2012. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://riUNET.upv.es/bitstream/handle/10251/17653/tesisUPV3951.pdf>

[138] ROATI, C. et al. Preliminary Evaluation of the Potential Biogas Production of Food-Processing Industrial Wastes [en línea]. *American Journal of Environmental Sciences*, 2012, No. 8, 291-296. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/8aff/c2e9dfb6873a4852258300d7ff31c46dac89.pdf>

[139] TOSCANO, G. et al. Analysis of the characteristics of the residues of the wine production chain finalized to their industrial and energy recovery [en línea]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, No. 55, 260-267. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953413000652>

[140] MOLDES, A. B. et al. Negative effect of discharging vinification lees on soils [en línea]. *Bioresource Technology*, 2008, No. 99, 5991-5996. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407008413>

[141] REGO GARCÍA, E. *Diseño del sistema de refrigeración de una bodega de vinificación en tinto* [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad de Cádiz, 2008. [Consultado 9 noviembre 2019]. Disponible en: <http://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6606/34209621.pdf>

[142] FERRER, J. et al. Agronomic use of biotechnologically processed grape wastes [en línea]. *Bioresource Technology*, 2001, No. 76, 39-44. [Consultado 8 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852400000766>

[143] BUSTAMANTE M. A. et al. Agrochemical characterisation of the solid by-products and residues from the winery and distillery industry [en línea]. *Waste Management*, 2008, No. 28, 372-380. [Consultado 8 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X07000438>



- [144] AGRALCO SOCIEDAD COOPERATIVA. *Aprovechamiento energético de residuos* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2016/05/Ferm%C3%ADn-Esandi-GAS-NATURAL-LOGRO%C3%910-para-pdf.pdf>
- [145] CONSEJO REGULADOR DE LA DENOMINACIÓN DE ORIGEN RIOJA. *Estadísticas 2018. El Rioja en cifras* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.riojawine.com/wp-content/uploads/1/2019/04/ESTADISTICAS\\_Rioja\\_2018.pdf](https://www.riojawine.com/wp-content/uploads/1/2019/04/ESTADISTICAS_Rioja_2018.pdf)
- [146] FERNÁNDEZ, M. *Muga, tres generaciones de Haro a Asia* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.bodegasmuga.com/wp-content/uploads/2008/01/Clipping\\_120726\\_Expansion.pdf](https://www.bodegasmuga.com/wp-content/uploads/2008/01/Clipping_120726_Expansion.pdf)
- [147] RODRÍGUEZ LUENGO, R. Anejo nº 2: Ingeniería del proceso [en línea]. En: *Mejora de bodega en Valdefuentes (Cáceres)*. Universidad de Castilla La Mancha, 2002. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [https://previa.uclm.es/area/ing\\_rural/Proyectos/RamonaRodriguez/04-Anejo2.PDF](https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Proyectos/RamonaRodriguez/04-Anejo2.PDF)
- [148] BODEGAS MUGA. *Bodegas Muga la excelencia de la tradición familiar* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.bodegasmuga.com/wp-content/uploads/2008/01/Travelport-01.10.09.pdf>
- [149] BODEGAS MUGA. *El proceso: ¿cómo elaboramos nuestros vinos?* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.bodegasmuga.com/la-bodega/proceso/>
- [150] CAMPOS POZUELO, E. et al. *Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [http://www.arc-cat.net/es/altres/purins/guia/pdf/guia\\_dejeccions.pdf](http://www.arc-cat.net/es/altres/purins/guia/pdf/guia_dejeccions.pdf)
- [151] HERNÁNDEZ LÓPEZ, J. *Diseño de un sistema para el aprovechamiento energético de biogás a partir de los residuos generados por el ganado vacuno en la Vaquería 101 perteneciente a la empresa pecuaria "Camilo Cienfuegos" (Pinar del Río, Cuba)* [en línea]. Trabajo fin de grado. Universidad Pública de Navarra, 2014. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://academica.unavarra.es/handle/2454/13345>
- [152] HAJJI, A. y RHACHI, M. The Influence of Particle Size on the Performance of Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste [en línea]. *Energy Procedia*, 2013, No.



36, 515-520. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213011454>

[153] CME. *Trituratori per raspi* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.cme-re.it/wp-content/uploads/2018/12/Catalogo-TR 2018.pdf>

[154] AGROVIN. *Aspiradores de raspón* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/45198/aspirador.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/45198/aspirador.pdf)

[155] ENOVENETA. *Pompa a lobi* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.enoveneta.it/new/wp-content/uploads/2019/04/PL LEAFLET A3 IT-EN 2018.pdf>

[156] URBINA VINOS. *Bombas que se utilizan en las bodegas para el transporte de vino y uvas* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://urbinavinos.blogspot.com/2012/10/bombas-que-se-utilizan-en-las-bodegas.html>

[157] ARHOUN, B. et al. Co-Digestion of Mixed Sewage Sludge and Fruit and Vegetable Wastes. Effect of Different Mixtures on Biogas Yield [en línea]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, No 262, 1268-1274. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/9937/Proceedings-iwblcm2015%20%20arhoun%20%282%29.pdf?sequence=3>

[158] CABBAI, V. et al. BMP test of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge [en línea]. *Waste Management*, 2013, No. 33, 1626-1632. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13001621>

[159] DA ROS, C. et al. *Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Winery Wastewater Sludge and Wine Lees: an Integrated Approach for Wine Industry*. [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [http://uest.ntua.gr/iwwatv/proceedings/presentations/21\\_May/SESSION\\_VI/the\\_mesophilic\\_anaerobic\\_co\\_digestion\\_of\\_winery\\_waste.pdf](http://uest.ntua.gr/iwwatv/proceedings/presentations/21_May/SESSION_VI/the_mesophilic_anaerobic_co_digestion_of_winery_waste.pdf)

[160] COHEN, M. F. et al. *Wastewater Polishing by a Constructed Wetland and Anaerobic Digestion of Harvested Phytomass for Production of Bioenergy* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://cohenlab.pbworks.com/w/file/fetch/50031821/WRPI%20Jan2012%20poster SR.pdf>

- [161] VADEQUÍMICA. *Bicarbonato sódico alimentario (25 kg)* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.vadequimica.com/bicarbonato-sodico-alimentario.html>
- [162] PELÁEZ ROMERO, G. Hormigón [en línea]. En: *Selección y procesos de degradación de materiales en instalaciones de tratamiento y conducción de agua*. Proyecto fin de carrera. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, 2006 [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4102/fichero/3.+HORMIG%C3%93N.pdf>
- [163] BAYONA VILLANUEVA, J. *Diseño de una instalación de biogás mediante digestión anaerobia y valorización de los residuos obtenidos* [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid, 2010. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/10128>
- [164] España. Real decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE -08). *Boletín Oficial del Estado*, 22 de agosto, núm. 203.
- [165] GENC, M. et al. Exergy Analysis of Wine Production: Red Wine Production Process as a Case Study [en línea]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, No. 117. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/313831915\\_Exergy\\_Analysis\\_of\\_Wine\\_Production\\_Red\\_Wine\\_Production\\_Process\\_as\\_a\\_Case\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/313831915_Exergy_Analysis_of_Wine_Production_Red_Wine_Production_Process_as_a_Case_Study)
- [166] GOBIERNO DE LA RIOJA. *Datos de la estación meteorológica de Haro (2009-2018)* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.larioja.org/emergencias-112/es/meteorologia/datos-actuales-rioja/detalle-estacion?homepage=2&cod\\_muni=71](https://www.larioja.org/emergencias-112/es/meteorologia/datos-actuales-rioja/detalle-estacion?homepage=2&cod_muni=71)
- [167] ELORDI GARCÍA, L. *Diseño de un digestor para una planta de biogás agroindustrial* [en línea]. Trabajo final de grado. Santander: Universidad de Cantabria, 2017. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/11909/Elordi%20Garc%C3%ADa%2C%20Lucas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [168] CORONEL TORO, J. F. et al. *Colección de tablas, gráficas y ecuaciones de transmisión de calor* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion\\_tablas\\_graficas\\_TC.pdf](http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion_tablas_graficas_TC.pdf)
- [169] CRISON INSTRUMENTS. *Electrodo de pH 53 34* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.crisoninstruments.com/es/aguas-industria/electrodos-de-ph-2/electrodos-de-ph-con-sensor-de-temperatura/electrodo-de-ph-53-34>

- [170] CRISON INSTRUMENTS. *Sonda de inmersión In 61* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.crisoninstruments.com/es/aguas-industria/porta-electrodos-de-inmersion-/porta-electrodos-de-inmersion/sonda-de-inmersion-in-61>
- [171] CRISON INSTRUMENTS. *pH-metro PH27P* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <http://www.crisoninstruments.com/it/aguas-industria/phmetro/misuratore-di-ph-a-1-canale/ph-metro-ph-27-p>
- [172] EMERSON. *Toma de muestras en reactor – Tipo PV. Modelo Neotecha* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.emerson.com/documents/automation/data-sheets-tipo-pv-toma-de-muestras-en-reactor-neotecha-es-es-5194886.pdf>
- [173] MILTON ROY EUROPE. *Bomba dosificadora electromagnética LMI C* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.sdm-sistemas.com/wp-content/uploads/2019/05/LMI-C-DSD-es.pdf>
- [174] LAMBDA LABORATORY INSTRUMENTS. *Dosificador de sólidos y polvos* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.lambda-instruments.com/es/dosificador-de-solidos/>
- [175] ARMATEC FTS. *Paddle Agitator* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.armatec-fts.com/en/products/agitators/paddle-agitator/>
- [176] KROHNE. *Optisonic 7300* [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://es.krohne.com/es/dlc/descargas-relacionadas-con-los-productos/caudalimetros/caudalimetros-ultrasonicos/optisonic-7300/>
- [177] BAQUERIZO CRESPO, R. J., et al. El modelo de Buswell. Aplicación y comparación. Principales factores que influyen en su aplicación [en línea]. *Virtual Pro*, 2016, No. 168. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/292159125>
- [178] GARCÍA GARCÍA-ROLDÁN, J. J., 2017. Evaluación de residuos biodegradables en la isla de Menorca. Potencial generador de biogás y fertilizantes orgánicos. En: *Consell Insular de Menorca* [en línea]. Disponible en: <http://www.cime.es/WebEditor/Pagines/file/PDS/evaluacion%20residuos%20biodegradables.pdf> [Consultado 8 noviembre 2019].
- [179] EL ACHKAR, J. H., et al. Anaerobic digestion of nine varieties of grape pomace: Correlation between biochemical composition and methane production [en línea].

*Biomass and Bioenergy*, 2017, No. 107, 335-344. [Consultado 8 noviembre 2019].  
Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/320876688>

[180] BRIGHT BIOMETHANE. *Biogas Upgrading to Biomethane* [en línea].  
[Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en:  
<https://www.brightbiomethane.com/biogas-upgrading/>

[181] ALTARE ENERGÍA. *Tecnología de microgeneración* [en línea]. [Consultado 8  
noviembre 2019]. Disponible en: [http://www.altare-  
energia.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=84&Itemid=99](http://www.altare-energia.com/index.php?option=com_content&view=article&id=84&Itemid=99)

[182] WETTERMANN, M. et al. *Compresión de biogás y biometano sin aceite* [en  
línea]. [Consultado 8 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.dge-  
wittenberg.de/espaniol/vortraege/Vortrag\\_%20Biomethanverdichtung.pdf](https://www.dge-wittenberg.de/espaniol/vortraege/Vortrag_%20Biomethanverdichtung.pdf)