

*UNIVERSIDAD DE OVIEDO*

MASTER UNIVERSITARIO EN BIOTECNOLOGÍA ALIMENTARIA

**“COMPARACIÓN DEL EFECTO  
FERTILIZANTE DE PRODUCTOS  
DERIVADOS DEL DIGESTATO  
OBTENIDO EN LA DIGESTIÓN  
ANAEROBIA DE RESIDUOS DE  
SUPERMERCADO”**

TRABAJO FIN DE MASTER

POR

CRISTINA PÉREZ MATA

JULIO, 2017





# Agradecimientos

La realización del presente Trabajo Fin de Máster ha sido posible gracias a la ayuda prestada en todo momento por la profesora Dña. Yolanda Fernández Nava, quien me ha acompañado durante estos meses, aportando valiosa información para el correcto desarrollo de la investigación presentada en este documento.

Deseo agradecer todo el apoyo y la ayuda que he recibido de los profesionales de la Universidad de Oviedo, tanto en la elaboración de este proyecto, así como en la impartición de las clases del Máster en Biotecnología Alimentaria, destacando la paciencia, cercanía y comprensión, con todos los alumnos, del coordinador de dicho Máster, D. Manuel Rendueles de la Vega.

Reconozco y admiro el apoyo de todos mis familiares y amigos, que, algunos sin entenderlo, han creído en mis ilusiones y me han apoyado en la lucha por lograr mis sueños, en especial mi madre, hermanos y mi pareja.

# Índice

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Consideraciones teóricas .....</b>	<b>6</b>
2.1.- FERTILIZACIÓN (NUTRICIÓN DE LOS CULTIVOS) .....	6
2.2.- FERTILIZACIÓN (EL SUELO AGRÍCOLA).....	11
2.3.- COMERCIALIZACIÓN DE FERTILIZANTES .....	12
2.4.- TIPOS DE FERTILIZANTES .....	15
2.4.1.- ABONOS INORGÁNICOS .....	17
2.4.2.- ABONOS ORGÁNICOS .....	20
2.4.3.- ABONOS ORGANO - MINERALES .....	23
2.4.4.- ENMIENDA CALIZA (cálcica o magnésica) .....	23
2.4.5.- ENMIENDA ORGÁNICA .....	24
2.5.- DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	25
2.5.1.- BIOGAS A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES .....	29
2.5.2.- ESTRUVITA Y FASE SÓLIDA .....	32
2.5.3.- ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS DE LA ESTRUVITA Y FASE SÓLIDA .....	36
2.5.4.- MARCO NORMATIVO VIGENTE .....	43
2.6.- ESPECIE DE CULTIVO: <i>LECHUGA BATAVIA</i> .....	48
2.6.1.- ORIGEN, TIPOS Y CARATERÍSTICAS .....	49
2.6.2.- VALORACION NUTRICIONAL .....	50
<b>3. Metodología de trabajo.....</b>	<b>52</b>
3.1.- ENSAYOS DE FERTILIZACIÓN .....	52
3.2.- BALANCE DE NUTRIENTES.....	54
3.2.1.- CRITERIOS DE DOSIFICACIÓN.....	56
3.2.2.- CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN DE ESTRUVITA.....	57
3.2.3.- CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS .....	59
3.3.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	60
3.3.1.- ACONDICIONAMIENTO DE LA TIERRA DE CULTIVO .....	61
3.3.2.- PREPARACION Y SEGUIMIENTO DEL CULTIVO .....	63
3.4.- MÉTODOS ANALÍTICOS .....	64
3.4.1.- MASA DE LAS PLANTAS COSECHADAS .....	64
3.4.2.- EFICIENCIA AGRONÓMICA .....	67
3.4.3.- ESTUDIO ESTADÍSTICO .....	67
3.4.4.- DETERMINACIÓN DE ESPECIES QUÍMICAS INORGÁNICAS (METALES) .....	70

3.4.4.1.- Pre-tratamiento de las muestras (Digestión por microondas) para el análisis del contenido en metales .....	72
3.4.4.2.- Espectrometría de Absorción Atómica (EAA).....	76
3.4.5.- DETERMINACIÓN DE NUTRIENTES (N y P) .....	79
3.4.5.1.- Pre-tratamiento de las muestras (Digestión por microondas) para el análisis de nutrientes .....	80
3.4.5.2.- Cromatografía líquida de alta eficacia (High performance liquid chromatography HPLC) .....	81
<b>4. Resultados experimentales .....</b>	<b>84</b>
4.1.- SEGUIMIENTO FOTOGRÁFICO DEL DESARROLLO DE LOS CULTIVOS.....	84
4.2. - MASA DE LAS PLANTAS COSECHADAS.....	90
4.3.- DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA AGRONÓMICA .....	92
4.4. - ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS .....	94
4.5. - ESPECIES QUÍMICAS INORGÁNICAS (METALES) .....	98
4.6. - NUTRIENTES (N y P) .....	105
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>109</b>
<b>6. Símbolos .....</b>	<b>111</b>
<b>7. Bibliografía .....</b>	<b>112</b>
7.1.- DOCUMENTOS Y ARTÍCULOS .....	112
7.2.- NORMATIVA .....	114
7.3.- PÁGINAS WEB .....	115
<b>8. Apéndices .....</b>	<b>116</b>
8.1.- CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUVITA Y FASE SÓLIDA.....	116
8.2.- PLANIFICACIÓN TEMPORAL DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER.....	117
8.3.- DOSIFICACIÓN DE DIGESTATO BRUTO Y FERTILIZANTE COMERCIAL.....	118
8.4.- FICHAS INTERNACIONALES DE SEGURIDAD QUÍMICA DE LOS REACTIVOS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN .....	119
8.5.- MASA HÚMEDA Y SECA DE LAS PLANTAS COSECHADAS .....	123
8.6.- HISTOGRAMAS DE FRECUENCIAS .....	125
8.7.- MEDIA ARITMÉTICA DEL CONTENIDO EN METALES DE LOS CULTIVOS: T, ED2 y M2t0.....	127
8.8.- CONTENIDO EN METALES DE LOS CULTIVOS: T, ED2 y M2t0 .....	129
8.9.- CONTENIDO EN METALES DEL CULTIVO DIGESTATO D1t2 .....	133
8.10.- CONTENIDO EN METALES DE LOS ENSAYOS DE TIERRA.....	134
8.11.- CROMATOGRAMAS DE LOS ENSAYOS: ED2 y M2T0.....	136

# Resumen

El aumento en la generación de residuos derivados de una sociedad de consumo ha provocado una mayor concienciación sobre la necesidad, tanto de acciones preventivas en su generación, como acciones correctivas en cuanto al aprovechamiento de los mismos. Una de las vías de aprovechamiento de la fracción orgánica contenida en estos residuos es su tratamiento en procesos de digestión anaerobia, transformándolos en biogás que puede ser utilizado como fuente de energía renovable. Sin embargo, el proceso genera también un subproducto, el digestato bruto, que aunque tiene potencial para ser utilizado como fertilizante, si no puede ser comercializado como tal, puede convertirse en un residuo que reduce la viabilidad económica de este proceso.

La finalidad que se persigue con la investigación presentada en este Trabajo Fin de Máster es estudiar el poder fertilizante de dos productos obtenidos a partir del digestato generado en el proceso de digestión anaerobia de la mezcla de residuos de supermercado. Estos productos son la estruvita y diferentes mezclas preparadas con estruvita y fase sólida del digestato. La especie vegetal que se ha estudiado es la *Lechuga Batavia*. Los resultados obtenidos en estos ensayos se comparan con un testigo (cultivo sin añadir ningún tipo de fertilizante) y también con los resultados logrados en una investigación anterior, en la que se estudió el poder fertilizante del digestato bruto y el efecto de la aplicación de un fertilizante comercial en el cultivo de la misma especie vegetal.

En los ensayos realizados se estudia el efecto de diferentes dosis, así como la influencia, en el caso de las mezclas, del tiempo transcurrido entre el abonado de la tierra y la siembra de las semillas. El desarrollo experimental consiste, en primer lugar, en un seguimiento del crecimiento de la especie mediante fotografías. Una vez finalizado éste se recolectan las plantas cultivadas y se determinan los siguientes parámetros: Masa húmeda y seca recogida; eficiencia agronómica que determinará que ensayo ha resultado ser el más satisfactorio; estudio estadístico de los datos, realizado con el programa IBM SPSS; determinación, para los ensayos en los que se ha obtenido un mejor comportamiento agronómico, del contenido en metales de la biomasa obtenida, así como de la tierra (con y sin abono) empleada en la investigación, y por último, análisis del contenido nutricional presente en los mejores cultivos ensayados.

# Abstract

The increase in the generation of residues resulting from a consumer society has led to an increasing awareness of the need for preventive actions in his generation, as corrective actions regarding the use of the same. One of the ways of taking advantage of the organic fraction contained in these wastes is their treatment in process of anaerobic digestion, transforming them into biogas that can be used as a source of renewable energy. However, the process also creates a by-product, the digestate gross, which although it has potential to be used as fertilizer, if it can't be marketed as such, can be converted in a residue that reduces the economic viability of this process.

The purpose pursued with the research presented in this final Master work is to study the fertilising of two products obtained from the digestate generated in the process of anaerobic digestion of mixture of supermarket waste. These products are struvite and different mixes with struvite and solid phase of the digestate. The plant species that has been studied is the Batavia lettuce. The results of these tests are compared with a witness (cultivation without adding any type of fertilizer) and also with the results achieved in previous research, which studied the fertilising of the gross digestate and the effect of the application of a commercial fertilizer in the cultivation of the same plant species.

In the tests we study the effect of different doses, as well as the influence, in the case of mixtures, the time elapsed between the subscriber of the land and sowing the seeds. Experimental development is, first of all, in a follow-up to the growth of the species through photographs. Once completed this cultivated plants are collected and determine the following parameters: Damp and dry mass collected; agronomic efficiency determined that test has proved to be the most satisfactory; data statistical study, conducted with the IBM SPSS program; determination, for testing that has obtained a better agronomic performance, content in the biomass obtained metals, as well as land (with and without manure) used in research, and finally, analysis of the nutritional contents present in the best tested crops.

# Lista de Figuras

Figura 1.1- Crecimiento de la población hasta el año 2050. ( <i>Fuente: La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050, FAO 2009</i> ).....	1
Figura 2.2 - Composición elemental promedia de las plantas. ( <i>Fuente: Los fertilizantes y su uso FAO, 2002</i> ) .....	7
Figura 2.3 - Esquema básico de la nutrición de los cultivos. ( <i>Fuente: Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España, MAPAMA, 2009</i> ).....	8
Figura 2.4 - Esquema básico de obtención de fertilizantes nitrogenados. ( <i>Elaboración propia</i> ) .....	18
Figura 2.5 - Esquema básico de obtención de fertilizantes fosfatados. ( <i>Elaboración propia</i> ) .....	19
Figura 2.6 - Esquema básico de obtención de fertilizantes potásicos. ( <i>Elaboración propia</i> ) .....	19
Figura 2.7 - Absorción de nutrientes en función del tiempo. ( <i>Fuente: Introducción a la Química Industrial, A. Vian Ortuño</i> ).....	21
Figura 2.8 - Características principales de los abonos inorgánicos ( <i>Elaboración propia</i> ) .	22
Figura 2.9 - Características principales de los abonos orgánicos ( <i>Elaboración propia</i> )....	22
Figura 2.10 - Esquema de la fermentación anaerobia ( <i>Fuente: Estudio técnico- económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia, Ana María González Cabrera 2014</i> ).....	26
Figura 2.11 - Diagrama de flujo de un proceso de digestión anaerobia (biogás / digestato). ( <i>Elaboración propia</i> ).....	27
Figura 2.12 - Fuentes de generación de biogás ( <i>Fuente: Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España, PROBIOGÁS 2009</i> ). .....	30
Figura 2.13 - Materias primas (subproductos agroindustriales) en la generación de biogás. ....	31
Figura 2.14 - Lechuga Batavia, Solara Amarilla. ....	49
Figura 3.15 - Esquema de un balance de nutrientes en sistemas agrícolas. ....	55
Figura 3.16 - Esquema del proceso de Espectrometría de Absorción Atómica. ....	76
Figura 3.17 - Lámpara de cátodo hueco. ....	76
Figura 3.18 - Esquema de un cromatógrafo de líquidos ( <i>Fuente: Cromatografía líquida de alta eficacia, CSIC</i> ) .....	82
Figura 4.19 - Representación gráfica de la masa (g) promedio por planta húmeda de los ensayos comparados. ....	92
Figura 4.20 - Representación gráfica de la E.A. (%) de los ensayos comparados. ....	93
Figura 4.21 - Prueba T para muestras independientes, MEZCLA. ....	97
Figura 4.22 - Cantidad de metales promedio presentes en los mejores ensayos probados en la lechuga Batavia.....	99

Figura 4.23 - Comparación del contenido en metales de los mejores ensayos en la lechuga Batavia con los límites establecido en la normativa europea vigente. ....	101
Figura 4.24 - Esquema general del balance de metales aplicado a los ensayos ED2 y M2t0. ....	102
Figura 8.25 - Histogramas de frecuencias de los ensayos correspondientes al testigo, estruvita y mezcla. ....	126
Figura 8.26 - Cromatogramas: Réplicas 1, 2 y 3, respectivamente, del ensayo ED2.....	136
Figura 8.27 - Cromatogramas: Réplicas 1, 2 y 3, respectivamente, del ensayo M2t0. ....	137

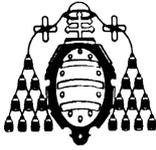
# Lista de Tablas

Tabla 1.1- Estimación del % de subproductos generados en diferentes sectores alimentarios. ( <i>Fuente: Apuntes de la asignatura Tratamiento de Efluentes y Residuos de la Industria Alimentaria, MBTA</i> ).....	3
Tabla 2.2 - Formas químicas en las que se asimilan los nutrientes. ( <i>Fuente: Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España, MAPAMA, 2009</i> ).....	9
Tabla 2.3 - Composición agronómica del digestato bruto, estruvita y fase sólida. ....	37
Tabla 2.4 - Características del abono nitrogenado mixto. ( <i>Fuente: Anexo I, Real Decreto 506/2013</i> ).....	39
Tabla 2.5 - Características de los abonos órgano-minerales nitrogenado / NP. ( <i>Fuente: Anexo I, Real Decreto 506/2013</i> ) .....	40
Tabla 2.6 - Contenido en nutrientes de diferentes combinaciones de estruvita y fase sólida. ....	41
Tabla 2.7 - Límite máximo de metales pesados para fertilizantes cuyo origen es animal o vegetal. ( <i>Fuente: Anexo V, Real Decreto 506/2013</i> ).....	42
Tabla 2.8 - Composición nutricional de la especie vegetal: Lechuga. ( <i>Fuente: Lechuga, Fundación Española de la Nutrición <a href="http://www.fen.org.es/mercadoFen/pdfs/lechuga.pdf">http://www.fen.org.es/mercadoFen/pdfs/lechuga.pdf</a></i> ) .....	50
Tabla 3.9 - Nomenclatura de los ensayos realizados.....	53
Tabla 3.10 - Requerimientos nutricionales para la Lechuga Batavia. ( <i>Fuente: Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometanización, PROBIOGÁS 2011</i> ) .....	57
Tabla 3.11 - Dosificación de estruvita para cada dosis por semillero. ....	58
Tabla 3.12 - Aporte real de nutrientes para la dosis óptima de estruvita. ....	58
Tabla 3.13 - Dosificación de las mezclas por semillero.....	59
Tabla 3.14 - Aporte real de nutrientes para las tres mezclas ensayadas.....	60
Tabla 3.15 - Cantidades a aplicar para el cultivo de la Lechuga Batavia.....	62
Tabla 3.16 - Características instrumentales de la EAA.....	77
Tabla 4.17 - Número de plantas recolectadas y masas (g) promedio de los ensayos comparados en la investigación.....	91
Tabla 4.18 - Resumen de los parámetros estadísticos analizados. ....	95
Tabla 4.19 - Prueba T para muestras independientes, ESTRUVITA.....	96
Tabla 4.20 - Contenido en metales presente en condiciones iniciales y finales para el ensayo ED2.....	104
Tabla 4.21 - Contenido en metales presente en condiciones iniciales y finales para el ensayo M2t0. ....	104
Tabla 4.22 - Balance de metales en los ensayos ED2 y M2t0.....	105
Tabla 4.23 - Medias aritméticas de diversos parámetros: masa húmeda / concentración de nitratos / concentración de fosfatos. ....	107

Tabla 4.24 - Contenido en nutrientes de la mejor planta del ensayo ED2 y del ensayo M2t0. ....	107
Tabla 4.25 -Comparación del contenido nutricional de la mejor planta del ensayo ED2 y del ensayo M2t0 con los datos bibliográficos. ....	108
Tabla 8.26 - Caracterización de la estruvita y fase sólida. ....	116
Tabla 8.27 - Dosificación de digestato bruto por semillero y dosis. ....	118
Fotografía 8.28 - Fertilizante químico comercial. ....	118
Tabla 8.29 - Masa cosechada (g) del testigo y de las dosis de estruvita. ....	123
Tabla 8.30 - Masa cosechada (g) de las mezclas probadas a diferentes tiempos de siembra. ....	124
Tabla 8.31 - Media aritmética (mg metal / L muestra) del contenido en metales del testigo. ....	127
Tabla 8.32 - Media aritmética (mg metal / L muestra) del contenido en metales de ED2 y M2t0. ....	128
Tabla 8.33 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra bruta) del testigo. ....	129
Tabla 8.34 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra bruta) de ED2 y M2t0. ....	130
Tabla 8.35 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra seca) del testigo. ....	131
Tabla 8.36 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra seca) de ED2 y M2t0. ....	132
Tabla 8.37 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra bruta) de digestato D1t2. ....	133
Tabla 8.38 - Media aritmética (mg metal / L muestra) del contenido en metales de la tierra sin abonar. ....	134
Tabla 8.39 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra seca) de la tierra sin abonar. ....	134
Tabla 8.40 - Media aritmética (mg metal / L muestra) del contenido en metales de la tierra final del cultivo de ED2. ....	134
Tabla 8.41 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra seca) de la tierra final del cultivo de ED2. ....	135
Tabla 8.42 - Media aritmética (mg metal / L muestra) del contenido en metales de la tierra final del cultivo de M2t0. ....	135
Tabla 8.43 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra seca) de la tierra final del cultivo de ED2. ....	135

# Lista de Fotografías

Fotografía 2.1 - Reactor de mezcla perfecta empleado en la digestión anaerobia de residuos de supermercado. ....	28
Fotografía 2.2 - Muestra de digestato .....	33
Fotografía 2.3 - Muestra de fracción sólida.....	34
Fotografía 2.4 - Muestra de estruvita. ....	35
Fotografía 3.5 - Aspecto de la tierra natural empleada en los ensayos. ....	61
Fotografía 3.6 - Mortero de porcelana. ....	62
Fotografía 3.7 - Crisol con el contenido de un alveolo. ....	65
Fotografía 3.8. - Balanza analítica, marca <i>Mettler Toledo</i> , modelo <i>AT261 DeltaRange</i> . ...	65
Fotografía 3.9 - Estufa de precisión universal " <i>Digitronic</i> ", marca <i>JP Selecta</i> . ....	66
Fotografía 3.11 - Almacenamiento de las plantas cosechadas. ....	66
Fotografía 3.12 - Digestor por microondas <i>ETHOS 1</i> .....	73
Fotografía 3.13 - Vasos de teflón, <i>ETHOS 1</i> . ....	73
Fotografía 3.14 - Sonda de temperatura colocada en el vaso de control. ....	74
Fotografía 3.15 - A la izquierda: Placa calefactora marca <i>Stuart</i> modelo <i>SD 500</i> ,.....	75
Fotografía 3.16 - Espectrómetro de absorción atómica, marca <i>Perkin Elmer</i> , modelo <i>PinAAcle Serie 900F</i> . ....	78
Fotografía 3.17 - Cromatógrafo líquido de alta eficacia, marca <i>Metrohm</i> , modelo <i>861 Advanced Compact IC</i> . ....	83
Fotografía 4.18 - Aspecto de los cultivos ensayados, 2 semanas desde la siembra. ....	85
Fotografía 4.19 - Aspecto de los cultivos ensayados, 5 semanas desde la siembra. ....	86
Fotografía 4.20 - Aspecto final de los cultivos ensayados, 8 semanas desde la siembra. ..	87
Fotografía 4.21 - Aspecto de los ensayos tras tres meses desde el inicio de la plantación. ....	90



# 1. Introducción

A lo largo del siglo XX, la utilización de combustibles fósiles en el mundo se multiplicó por doce, y la extracción de recursos materiales, por treinta y cuatro<sup>1</sup>. Cada ciudadano de la Unión Europea consume hoy en día, aproximadamente, dieciséis toneladas de materiales al año, de las cuales seis se desechan, descargándose la mitad en vertederos. Sin embargo, las tendencias apuntan al fin de una era en la que los recursos eran abundantes y baratos. Las empresas se enfrentan al aumento de los costes de materias primas y minerales esenciales, cuya escasez y volatilidad de precios están teniendo un efecto perjudicial para la economía global. Las fuentes de minerales, metales y energía, así como las reservas pesqueras, la madera, el agua, los suelos fértiles, el aire limpio, la biomasa y la biodiversidad, están bajo presión; lo mismo le ocurre a la estabilidad del sistema climático.

Según la FAO<sup>2</sup>, en el año 2050 la población mundial será de 9.100 millones de habitantes, frente a los más de 7.000 millones actuales<sup>3</sup>.

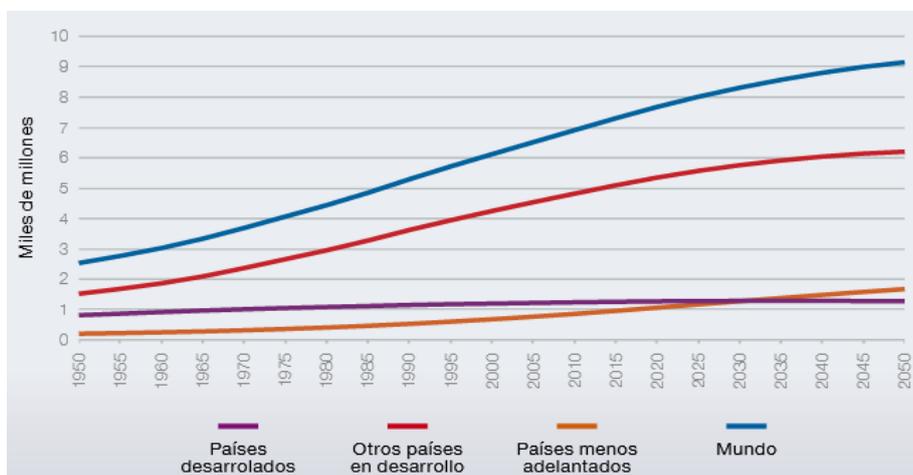
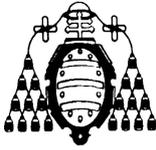


Figura 1.1- Crecimiento de la población hasta el año 2050. (Fuente: *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*, FAO 2009)

<sup>1</sup> Referencia: Comisión Europea: *Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos*, Bruselas 20/9/2011.

<sup>2</sup> FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas <http://www.fao.org/home/en/>

<sup>3</sup> Referencia: FAO: *Como Alimentar al Mundo 2050*.



Para alimentar a esta población más numerosa la producción de alimentos, piensos y fibra debería aumentar alrededor de un 70% de aquí a 2050, el 60% de los principales ecosistemas del mundo que contribuyen a la producción de estos recursos ya se han degradado o se están utilizando de manera insostenible. Si se sigue empleando los recursos al ritmo actual, para el año 2050 se necesitaría, en conjunto, el equivalente de más de dos planetas para satisfacer la demanda existente<sup>4</sup>.

Esta situación deriva en dos cuestiones fundamentales que son la base del desarrollo de este proyecto, por un lado el empleo de fertilizantes como fuente de nutrientes adicionales asimilable por las plantas, que permita incrementar la producción agrícola aumentando los rendimientos de los cultivos, y por otro lado, la problemática existente con el aumento de residuos alimentarios, cuyo destino final en la mayoría de las ocasiones es el vertedero. Esta investigación trata de complementar ambas cuestiones probando el poder fertilizante de la estruvita y de diferentes mezclas obtenidas por la combinación de estruvita y fase sólida, ambos productos derivados del digestato bruto, subproducto del proceso biotecnológico: digestión anaerobia, empleando como materia prima para su elaboración una mezcla de residuos de supermercado.

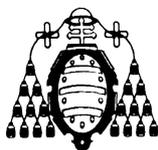
A continuación se pretende mostrar una visión global de los antecedentes en materia de consumo de fertilizantes y también en relación a la cantidad de residuos alimentarios que se generan.

Según la Comisión Europea, se calcula que cada año se desperdician aproximadamente 89 millones de toneladas de comida en la Unión Europea (o 180 kg / persona), lo que equivale al 20% de los alimentos producidos. La mayor parte de los residuos alimentarios se generan en los hogares, representando un 42% del total, en relación a la fase de fabricación, la generación de residuos es del 39%, y finalmente el 19% restante está asociado a la restauración y distribución de los productos. España se

---

<sup>4</sup> Referencia: Comisión Europea: *Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos*, Bruselas 20/9/2011.

Documento que propone formas de aumentar la productividad de los recursos y desvincular el crecimiento económico del uso de los recursos y su impacto medioambiental.



encuentra en el séptimo puesto de países de la UE que más comida desperdicia (7,7 millones de toneladas)<sup>5</sup>.

En la tabla mostrada a continuación se detallan algunos de los subproductos/residuos más relevantes generados en la industria alimentaria, haciendo referencia al elevado porcentaje de materia prima que no se convierte en producto final y que es susceptible de valorización:

Actividad	Subproductos	Materia prima que se convierte en subproducto
Carne (mataderos)	Sangre, vísceras, huesos, intestinos, piel, grasas, pelo y plumas	30-52%
Pescado y marisco	Cabezas, vísceras, colas, piel, espinas, conchas y migas	30-75%
Vegetales	Hojas semillas, pieles, tallos y pulpa	5-50%
Queso	Lactosuero	90%
Aceite vegetal	Alpechín, hojas, orujo	40-70%
Remolacha azucarera	Hojas, tallos, pulpa y melazas	88%

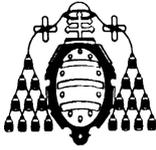
Tabla 1.1- Estimación del % de subproductos generados en diferentes sectores alimentarios.  
(Fuente: Apuntes de la asignatura Tratamiento de Efluentes y Residuos de la Industria Alimentaria, MBTA)

La minimización y valorización de estos subproductos presenta una doble ventaja: reducir la carga contaminante, contribuyendo al desarrollo sostenible del sector y obtener un mejor rendimiento de las materias primas mediante su uso más racional. La legislación medioambiental<sup>6</sup> es cada vez más exigente en relación a las medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos.

Cabe mencionar que una parte importante de estos residuos alimentarios se producen al intentar cumplir con la normativa vigente en tema de protección de la salud pública y de

<sup>5</sup> MAPAMA: Estrategia: "Más alimento, menos desperdicio"  
[http://www.mapama.gob.es/es/alimentacion/temas/estrategia-mas-alimento-menos-desperdicio/Definiciones\\_cifras.aspx](http://www.mapama.gob.es/es/alimentacion/temas/estrategia-mas-alimento-menos-desperdicio/Definiciones_cifras.aspx)

<sup>6</sup> Ley 22/2011, 28 julio, residuos y suelos contaminados <https://www.boe.es/boe/dias/2011/07/29/pdfs/BOE-A-2011-13046.pdf>



los consumidores (alimentos contaminados, productos que no cumplen con las especificaciones nutritivas exigidas, fechas de caducidad, deterioro de los alimentos durante el transporte / distribución...). Por ello, dado que inevitablemente siempre se van a generar residuos alimentarios, es imprescindible desarrollar un proceso de valorización de los mismos.

A tenor de lo expuesto hasta el momento, EMULSA ha desarrollado un proyecto piloto de recogida selectiva de materia orgánica en Gijón que prevé dar servicio a unos 65.000 habitantes antes del fin de 2017. Es una medida encaminada a cumplir con la legislación europea, que obliga a que, en el año 2020, el 50% de los residuos de la ciudad sean reciclados frente al 24% actual. Con la materia orgánica que se recoja, a través de un proceso de digestión anaerobia se obtendrá biogás y compost.

Retomando el tema de la necesidad de aumentar la producción mundial de alimentos para abastecer a la población, la opción de destinar nuevas tierras al cultivo en detrimento de las grandes masas forestales es un desastre ecológico. Es necesario pues, el desarrollo de una agricultura sostenible que, respetuosa con el medio ambiente, sea capaz de incrementar los rendimientos agrícolas y esto se puede lograr a través del empleo racional de fertilizantes. La IFA<sup>7</sup> afirma que "los fertilizantes alimentan al mundo"; esta afirmación se sustenta sobre la base de que el empleo de fertilizantes es responsable del incremento del 50% de la producción agrícola mundial.

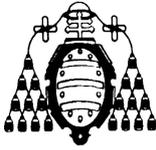
De acuerdo con los datos expuestos por la IFA para la campaña agrícola 2014/2015, el consumo global de nutrientes fue de 183,4 millones de toneladas, lo que representa una recuperación del 1,5% con respecto a la campaña 2013/2014. Este incremento ha afectado a los tres nutrientes principales: en el caso del nitrógeno (0,4%), con un volumen de 110,3 millones de toneladas; 41,1 millones de toneladas en el caso del fósforo (1,6%) y finalmente para el potasio se ha alcanzado 32 millones de toneladas de consumo (5,4%)<sup>8</sup>.

En el caso de la Unión Europea se dispone de datos recientes de la última campaña (2015/2016) en la que el consumo de nutrientes por los europeos ha sido aproximadamente

---

<sup>7</sup> IFA: International Fertilizer Association <http://www.fertilizer.org/>

<sup>8</sup> Referencia: *Informe anual del ejercicio 2015* FERTIBERIA S.A.



de 16,5 millones de toneladas. Esta cantidad se ha aplicado a 133,7 millones de hectáreas de tierras de cultivo, dejando sin fertilizar otras 45,2 millones de hectáreas cultivables<sup>9</sup>.

Las variaciones de la estructura de los cultivos en España y las decisiones del agricultor al respecto, van a estar condicionadas por dos aspectos fundamentales, como son, los precios de los productos y las medidas concretas que se apliquen de acuerdo a la PAC<sup>10</sup> (representa una asociación entre la agricultura y la sociedad europea cuyos principales objetivos son mejorar la productividad agrícola, garantizar a los agricultores de la UE una vida razonables, asegurar la seguridad alimentaria, así como la protección del medio ambiente en su conjunto).

Las primeras estimaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, apuntan a que el consumo de fertilizantes en 2016 en España se ha reducido en un 7% a consecuencia de las condiciones climatológicas acaecidas en el último trimestre del año 2015 (sequía y temperaturas anormalmente altas).

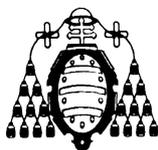
A pesar de que existen situaciones que no se pueden alterar, como lo es la climatología, es esencial abrir nuevas líneas de investigación que consigan aumentar los rendimientos de producción agrícola. Mejorar y mantener una adecuada fertilidad del suelo a través de una fertilización equilibrada y sostenible es un aspecto crítico para producir rendimientos elevados y duraderos en el tiempo.

Este proyecto pretende mostrar una alternativa de fertilización, diferente a la tradicional, poco explotada, que además de servir como fuente de nutrientes para el desarrollo de los cultivos (abono), permite la reutilización de residuos alimentarios.

---

<sup>9</sup> Referencia: *Forecast of food, farming and fertilizer use in the European Union 2016-2026*, Fertilizers europe.

<sup>10</sup> PAC: Política Agrícola Común



## 2. Consideraciones teóricas

### 2.1.- FERTILIZACIÓN (NUTRICIÓN DE LOS CULTIVOS)

A lo largo de los siglos, se han llevado a cabo numerosos descubrimientos que han permitido avanzar en el conocimiento de la nutrición vegetal. Inicialmente el agricultor se cambiaba de lugar a medida que iba agotando la tierra y, ya en la época de los romanos, se comenzó a utilizar el estiércol para dar "calor" al suelo. En el siglo VII se estableció un régimen de rotación de cultivos, que permitía al suelo recuperar los nutrientes tras un ciclo de cosecha. En 1840, *Justus Von Liebig*<sup>11</sup>, formuló la "ley del mínimo" en la que se expresaba que el correcto crecimiento de las plantas iba a depender de los nutrientes disponibles sólo en cantidades mínimas. La síntesis del amoníaco, patentada en 1908 por *Fritz Haber*<sup>12</sup>, en Alemania y el desarrollo a escala comercial de este descubrimiento, realizado por *Carl Bosch*<sup>13</sup>, que diseñó la primera planta industrial, puede considerarse como uno de los más relevantes hitos en la historia de la fertilización, fue a partir de entonces, cuando se generalizó el empleo del nitrógeno en la agricultura.

Se puede resumir que, aunque se llevan siglos investigando cómo se nutren las plantas, sólo se lleva unos 150 años aplicando fertilizantes químicos a los cultivos.

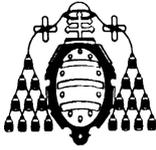
El primer aspecto que hay que considerar en relación a la fertilización de los cultivos es la naturaleza y el suministro de los nutrientes de las plantas. Las plantas elaboran su biomasa usando agua, dióxido de carbono tomado del aire, energía solar y nutrientes extraídos del suelo y del agua; son consideradas los únicos productores netos de energía del sistema biológico, a excepción de algunos microorganismos. Para un óptimo crecimiento de la planta, los nutrientes deben ser solubles en el agua contenida en el suelo, en cantidades adecuadas y equilibradas, de acuerdo con el momento de demanda del cultivo.

---

<sup>11</sup> *Justus von Liebig* (12 de mayo de 1803 – 18 de abril de 1873), químico alemán

<sup>12</sup> *Fritz Haber* (9 de diciembre de 1868 - 29 de enero de 1934), químico alemán galardonado con el Premio Nobel de Química por el desarrollar la síntesis del amoníaco

<sup>13</sup> *Carl Bosch* (27 de agosto de 1874 - 26 de abril de 1940), químico e ingeniero alemán



Las plantas toman los nutrientes principalmente de:

- Las reservas naturales del suelo
- Fertilizantes orgánico e inorgánicos
- Nitrógeno atmosférico a través de la fijación biológica
- Depositiones aéreas de origen eólico y pluvial
- Irrigación, aguas subterráneas y sedimentación provocada por las escorrentías

Estas fuentes son utilizadas por los agricultores de acuerdo con la disponibilidad y posibilidad económica. La cantidad total de los nutrientes disponibles para un cultivo es un factor fundamental en la determinación del rendimiento final de la cosecha.

En la figura mostrada a continuación se indican los elementos químicos esenciales presentes en las plantas:

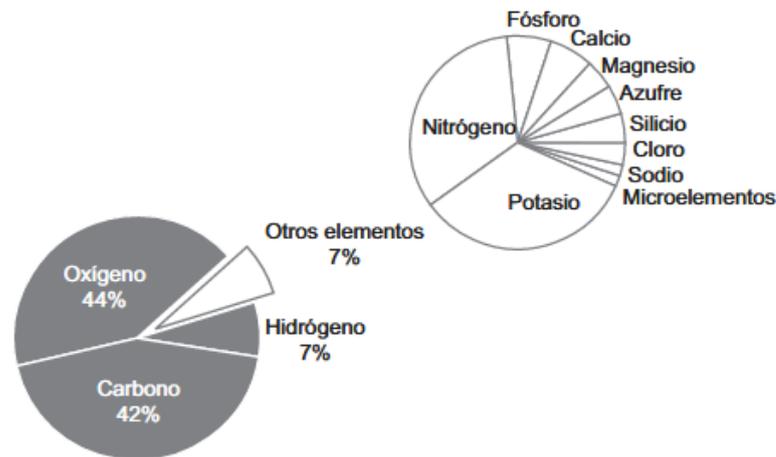
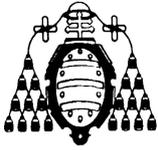


Figura 2.2 - Composición elemental promedio de las plantas. (Fuente: *Los fertilizantes y su uso* FAO, 2002)

Los constituyentes masivos de las plantas son el oxígeno (O), carbono (C) e hidrógeno (H), los dos primeros son tomados del aire a través de la fotosíntesis y el oxígeno por la respiración celular; el agua proporciona H y O, además de tener múltiples papeles en la fisiología vegetal. El resto de elementos minerales, que representan el 7% del total, son absorbidos principalmente por las raíces de la solución del suelo.

Estos nutrientes se pueden clasificar en dos grandes grupos, macronutrientes, que se necesitan en cantidades relativamente elevadas, y se pueden dividir a su vez, en dos grupos, los nutrientes principales (nitrógeno N, fósforo P y potasio K), y los nutrientes secundarios (calcio Ca, magnesio Mg y azufre S). En contraste con éstos se encuentran los



micronutrientes que son requeridos sólo en cantidades ínfimas para el correcto crecimiento de las plantas.

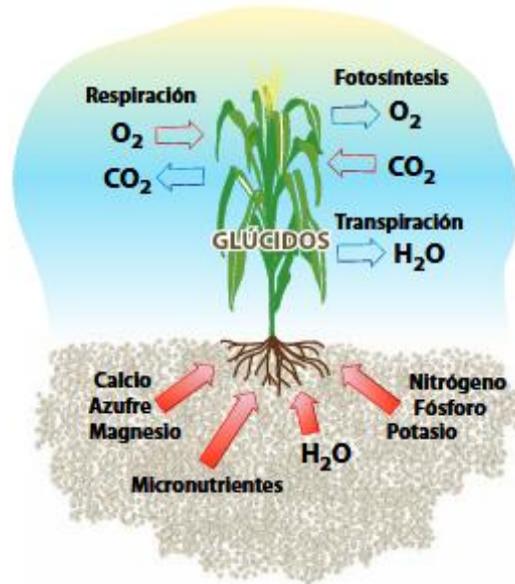
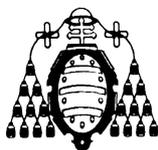


Figura 2.3 - Esquema básico de la nutrición de los cultivos. (Fuente: *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*, MAPAMA, 2009)

Los nutrientes deberán ser agregados al suelo, en las cantidades que se estimen oportunas, si éste es deficitario en alguno de los elementos mencionados con anterioridad. Este aporte se hace a través de lo que se denomina fertilizante o abono, se trata de cualquier sustancia orgánica o inorgánica, natural o sintética, que proporcione a las plantas uno o varios de los elementos nutritivos indispensables para su desarrollo vegetativo normal. La necesidad de aportar fertilizantes surge del concepto de factor limitante o esencial para el desarrollo de las plantas, entendido como cualquier circunstancia (agua, luz, temperatura, nutrientes) que condiciona dicho desarrollo. Evidentemente, el C, H y O nunca deben ser limitantes, dado su origen. El resto de elementos se incorporan a las plantas mediante la absorción radicular de las cantidades disueltas en el agua del suelo. Cosecha tras cosecha estos elementos son extraídos y pueden llegar a agotarse, por lo que hay que reponerlos directamente al suelo por adiciones convenientes (fertilización) o renunciar al cultivo (barbecho) durante el tiempo suficiente como para que los agentes atmosféricos y los microorganismos del suelo movilicen las reservas insolubles del terreno, descompongan los residuos de las cosechas anteriores (rastros) y pasen los elementos nutrientes que poseen las formas solubles asimilables.



NUTRIENTES ESENCIALES		
		Forma en la que se absorben
Macronutrientes (nutrientes principales)	Nitrógeno	$\text{NO}_3^-$ y $\text{NH}_4^+$
	Fósforo	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$
	Potasio	$\text{K}^+$
Macronutrientes (nutrientes secundarios)	Azufre	$\text{SO}_4^{2-}$
	Calcio	$\text{Ca}^{2+}$
	Magnesio	$\text{Mg}^{2+}$
Micronutrientes (metales)	Hierro	Se absorben como cationes divalentes o quelatos
	Manganeso	
	Zinc	
	Cobre	
	Níquel	

Tabla 2.2 - Formas químicas en las que se asimilan los nutrientes. (Fuente: Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España, MAPAMA, 2009)

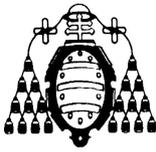
De los elementos esenciales, la ciencia de la fertilización del suelo se ocupa principalmente del N, el P y el K, a continuación se resumen las funciones de estos elementos en el cultivo vegetal<sup>14</sup>:

- **Nitrógeno:** Interviene en la multiplicación celular y se considera factor de crecimiento, es necesario para la formación de los aminoácidos, proteínas, enzimas, etc. De modo que, el aporte del nitrógeno en cantidades óptimas conduce a la obtención de forrajes y granos con mayor contenido proteico. Además presenta una relación directa con el contenido en vitaminas del cultivo generado. La falta de nitrógeno en las plantas se observa en las hojas que adquieren un color verde amarillento y es posible que la planta se marchite debido a la falta de clorofila.

El contenido de nitrógeno se expresa en su forma elemental: N

- **Fósforo:** Es considerado factor de precocidad, ya que activa el desarrollo inicial de los cultivos y favorece la maduración. Interviene en el transporte,

<sup>14</sup> Referencia: Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España, MAPAMA, 2009.



almacenamiento y transferencia de energía, además de formar parte de fosfolípidos y enzimas. La carencia de fósforo conduce a un desarrollo débil del vegetal, presentando un color azul verdoso oscuro, y puede llegar a caer de forma prematura.

El contenido de fósforo se expresa en forma de óxido ( $P_2O_5$ ):

$$(P) = (P_2O_5) \times \frac{2 \times 31 \frac{\text{g P}}{\text{mol}}}{142 \frac{\text{g } P_2O_5}{\text{mol}}} = 0,437 \times (P_2O_5) \quad (2.1)$$

- **Potasio:** Este componente juega un papel múltiple: mejora la actividad fotosintética, aumenta la resistencia de la planta a la sequía, heladas y enfermedades, promueve la síntesis de lignina, favorece la rigidez y estructura de las plantas, participa en la formación de proteínas. Su carencia provoca un retraso general en el crecimiento y un aumento de la vulnerabilidad de la planta a los posibles ataques de parásitos.

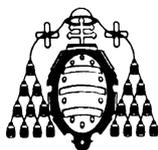
El contenido de potasio se expresa en forma de óxido ( $K_2O$ ):

$$(K) = (K_2O) \times \frac{2 \times 39,1 \frac{\text{g K}}{\text{mol}}}{94,2 \frac{\text{g } K_2O}{\text{mol}}} = 0,830 \times (K_2O) \quad (2.2)$$

Dado que los dos materiales objeto de estudio de la investigación desarrollada, incorporan cantidades significativas de otros nutrientes importantes para el desarrollo de los cultivos, se hace necesario realizar una breve descripción de los mismos.

La **ESTRUVITA**, también conocida como MAP (magnesium ammonium phosphate) se obtiene a partir de la cristalización de nitrógeno y fósforo en forma de fosfato de magnesio y amonio hexahidratado ( $NH_4MgPO_4 \times 6H_2O$ ). El magnesio es un nutriente secundario que forma parte de la molécula de clorofila, siendo por tanto esencial para la fotosíntesis y para la formación de otros pigmentos. Favorece el transporte y la acumulación de azúcares en los órganos de reserva, es constituyente de las paredes celulares e influye en los procesos de oxidación-reducción.

Por otro lado, la **FASE SÓLIDA** presenta un contenido relevante en ciertos elementos químicos importantes para el desarrollo de los cultivos, los datos numéricos



están recogidos en el apartado 2.5.3.- *ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS DE LA ESTRUVITA Y FASE SÓLIDA* del presente documento.

- Calcio: Es el elemento estructural de paredes y membranas celulares, y es básico para la absorción de elementos nutritivos.
- Sodio: No es un elemento esencial pero se puede emplear como componente auxiliar para el metabolismo y ayuda a regular el equilibrio interno del agua.
- Hierro: Interviene en la síntesis de la clorofila y en la captación y transferencia de energía en la fotosíntesis y en la respiración. Participa en reacciones de oxidación-reducción, como la reducción de nitratos.

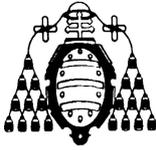
## 2.2.- FERTILIZACIÓN (EL SUELO AGRÍCOLA)

El abono ha de actuar a través del suelo, que es un medio complejo y activo desde los puntos de vista químico, físico y biológico. Los componentes que forman el suelo son<sup>15</sup>:

- Arcilla: Aluminosilicato de carácter coloidal (tamaño de grano inferior a  $2 \times 10^{-3}$  mm).
- Componentes sólidos más gruesos, como el limo ( $2 \times 10^{-2}$  a  $2 \times 10^{-3}$  mm), partículas de caliza y óxidos de hierro o aluminio hidratados, que dan porosidad.
- Materia orgánica procedente de la descomposición de residuos vegetales y animales. Una forma especialmente valiosa a que conduce la descomposición de estos residuos es el humus, de carácter coloidal, con importante papel en la fertilización y conservación de los suelos y de su porosidad. Dentro de la materia orgánica, aunque biológica, son imprescindibles los microorganismos, que hacen del suelo un sistema viviente. A parte de hongos y algas, en un gramo de suelo arcilloso hay unas  $5 \times 10^5$  bacterias, población veinte veces mayor si el suelo ha sido bien abonado.
- Aire y agua que aportan la necesaria porosidad del suelo.

---

<sup>15</sup> Referencia: *Introducción a la Química Industrial*, A. Vian Ortuño Capítulo 10 La roca fosfática como materia prima.



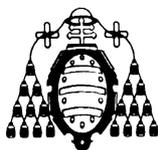
Dos aspectos de importancia preponderante para la fertilidad del suelo y, consecuentemente, para el crecimiento de las plantas, son la textura del suelo (proporciones relativas de arena, limo y arcilla presentes en el mismo) y la estructura del suelo (agregación de las partículas para formar fragmentos de mayor tamaño).

En el ámbito científico de la Química Agrícola, el objetivo de la fertilización del suelo va más allá de la superación del carácter limitante y puede añadir los siguientes objetivos:

- Favorecer el adecuado crecimiento, no sólo por aumento de la masa vegetal, sino por regulación del desarrollo preferente de ciertas partes de la planta.
- Aumentar la producción, bien de los órganos vegetativos (hojas), bien de los generativos (frutos).
- Mejorar la calidad de la planta o de sus frutos (mayor valor en el mercado por su aspecto o propiedades nutritivas), o su resistencia frente a influencias nocivas (escasez o salinidad del agua, plagas, etc.).

### **2.3.- COMERCIALIZACIÓN DE FERTILIZANTES**

La agricultura moderna está orientada hacia la producción de alimentos de calidad, dentro de una adecuada preservación del medio ambiente y de los recursos naturales, mediante el empleo de fertilizantes. Para ello es necesario garantizar que los productos utilizados en la nutrición vegetal y en la mejora de las características del suelo cumplen con dos requisitos fundamentales: eficacia agronómica y ausencia de efectos perjudiciales para la salud y el medio ambiente. Sin embargo, esta idea de agricultura sostenible se ve truncada debido a los importantes problemas que existen en la comercialización de productos fertilizantes dentro de la Unión Europea, en cuanto a normativa legal se refiere.



Por este motivo se ha desarrollado una Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo, publicada en marzo de 2016<sup>16</sup>, (será aplicable a partir del 1 de enero de 2018), con objeto de eliminar las barreras comerciales entre los estados miembros y permitir el intercambio y el uso de fertilizantes armonizados, sin obstáculos técnicos para el libre comercio. Así mismo, se considera una de las propuestas legislativas clave del plan de acción para la economía circular, basado en tres principios básicos: preservar y mejorar el capital natural controlando y equilibrando los flujos de recursos renovables; optimizar el uso de los recursos rotando productos, componentes y materiales con la máxima utilidad en todo momento; y fomentar la eficacia del sistema en relación al bienestar de la sociedad y la eliminación de externalidades (contaminación atmosférica, de las aguas y acústica o cambio climático) negativas.

Es un avance que está directamente relacionado con el tema desarrollado en esta investigación, ya que se pretende incentivar en la UE la producción de fertilizantes a partir de materias primas orgánicas o secundarias no importadas, como pueden ser los materiales derivados del digestato bruto (estruvita y fase sólida), cuyo origen son residuos alimentarios.

Este futuro Reglamento derogará el actual Reglamento vigente (CE) 2003/2003 de abonos<sup>17</sup>, pero permitirá que los fertilizantes ya armonizados permanezcan en el mercado si cumplen los nuevos requisitos de seguridad y calidad, con un plazo transitorio para su adaptación. Definirá las condiciones a las cuales los abonos producidos a partir de residuos y de subproductos animales pueden quedar excluidos de los controles que les impone el Reglamento (CE) 1069/2009<sup>18</sup>, además también se incorporarán modificaciones del Reglamento (CE) 1107/2009<sup>19</sup>, sobre su ámbito y definición, para dejar cabida en

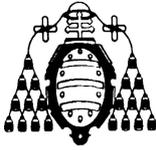
---

<sup>16</sup> *Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen disposiciones relativas a la comercialización de los productos fertilizantes con el marcado CE* <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2016/ES/1-2016-157-ES-F1-1.PDF>

<sup>17</sup> *Reglamento (CE) 2003/2003 relativo a los abonos* <http://www.boe.es/doue/2003/304/L00001-00194.pdf>

<sup>18</sup> *Reglamento (CE) 1069/2009 sobre normas sanitarias aplicables subproductos animales y productos derivados no destinados al consumo humano (SANDACH)* <https://www.boe.es/doue/2009/300/L00001-00033.pdf>

<sup>19</sup> *Reglamento (CE) 1107/2009 relativo a la comercialización de productos fitosanitarios* <https://www.boe.es/doue/2009/309/L00001-00050.pdf>



consecuencia, en fertilizantes, a otros productos que favorecen la asimilación de nutrientes por las plantas.

En primer lugar, cabe mencionar que algunos productos fertilizantes innovadores, que en muchos casos contienen nutrientes o materia orgánica reciclados a partir de biorresiduos o de otras materias primas secundarias (subproductos animales o de origen agrícola), en consonancia con el modelo de la economía circular, encuentran dificultades para acceder al mercado interior debido a la existencia de reglamentaciones y normas nacionales divergentes, concretamente en torno al 50% de los abonos actualmente comercializados quedan fuera del ámbito de aplicación del Reglamento vigente<sup>20</sup>.

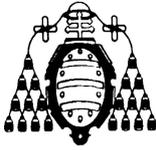
En la actualidad, la investigación, innovación e inversión se desarrollarán rápidamente, contribuyendo a la creación de empleo local y se generará valor añadido a partir de recursos secundarios, obtenidos a nivel interior que, de otro modo, habrían sido eliminados como residuos, provocando una innecesaria eutrofización y emisión de gases efecto invernadero. También existe una tendencia a la terciarización del sector, pues cada vez se personalizan más los productos atendiendo al análisis del suelo en el que se empleará el abono. No obstante, para los productos personalizados que contienen fertilizantes orgánicos, el acceso al mercado interior depende actualmente del reconocimiento mutuo y, por tanto, a menudo se ve obstaculizado.

El problema de los abonos innovadores con la estructura reglamentaria vigente es doble, por un lado el actual Reglamento está claramente hecho a medida para abonos inorgánicos bien caracterizados procedentes de materias primas primarias, y carece de los sólidos mecanismos de control y salvaguardias necesarios para crear confianza en los productos procedentes de materias orgánicas o secundarias, sujetas por su naturaleza a variaciones. Además, los vínculos con la legislación vigente sobre el control de los subproductos y residuos animales no son claros.

En resumen, las condiciones de competencia entre estos abonos innovadores, en consonancia con la economía circular, y los producidos conforme el modelo de economía

---

<sup>20</sup> Referencia: *Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen disposiciones relativas a la comercialización de los productos fertilizantes con el mercado CE*  
<https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2016/ES/1-2016-157-ES-F1-1.PDF>



lineal se inclinan a favor de estos últimos. Esta distorsión de la competencia dificulta la inversión en la economía circular. Aumentar la producción y el comercio de fertilizantes innovadores, diversificará la oferta de abonos para los agricultores, contribuyendo potencialmente a que la producción alimentaria sea más rentable y eficiente en cuanto al empleo de los escasos recursos naturales disponibles.

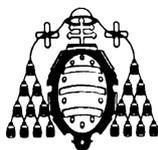
La otra limitación del actual Reglamento es que, incluso para nuevos fertilizantes inorgánicos procedentes de materias primas primarias, el procedimiento de homologación es largo y no puede seguir el ritmo del ciclo de innovación del sector de los fertilizantes. Por tanto es necesario revisar y modernizar a fondo la técnica legislativa, con el fin de incrementar la flexibilidad con respecto a los requisitos de los productos, manteniendo al mismo tiempo un elevado nivel de protección de la salud humana, animal y vegetal, la seguridad y el medio ambiente.

Respecto a las preocupaciones medioambientales derivadas de la contaminación de los suelos, las aguas continentales y marinas y, en última instancia, los alimentos, no se encuentran desarrolladas en el Reglamento vigente. Un aspecto bastante conocido es la presencia de cadmio en los abonos fosfatados inorgánicos, la ausencia de valores límite de la UE, hace necesario abordar esta cuestión y establecer límites armonizados que garanticen la protección de la salud y del medio natural.

## **2.4.- TIPOS DE FERTILIZANTES**

A pesar de la existencia de la propuesta de Reglamento, explicada en el apartado anterior, que deroga la normativa vigente en materia de abonos a principios del año 2018, es necesario recurrir al Reglamento (CE) 2003/2003, todavía vigente, para abordar el tema sobre los fertilizantes, teniendo en cuenta las limitaciones que éste presenta, en especial, con los abonos producidos a partir de materias orgánicas, como es el caso que nos ocupa.

El Reglamento (CE) 2003/2003 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 2003, relativo a los abonos, es una disposición comunitaria que refunde, simplifica y actualiza toda la normativa existente en el Unión Europea sobre los



fertilizantes minerales de uso más generalizado en la agricultura, fijando una serie de normas sobre su composición química, identificación, etiquetado o envasado, junto con una serie de anexos que hacen referencia a diversas cuestiones relacionadas con estos abonos: márgenes de tolerancia, métodos de toma de muestras y análisis, especificaciones sobre el nitrato amónico debido a su riesgo de explosión.

Para regular los aspectos indicados en este Reglamento, entra en vigor el 28 de junio de 2013 el Real Decreto 506/2013<sup>21</sup>, sobre productos fertilizantes, que tiene por objetivo establecer la normativa básica en materia de productos fertilizantes y las normas necesarias de coordinación con las comunidades autónomas.

En base al artículo 5, del citado Real Decreto, los productos fertilizantes que pueden usarse como abonos o enmiendas en agricultura y jardinería deben pertenecer a alguno de los siguientes tipos<sup>22</sup>:

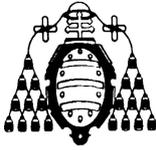
- Abonos inorgánicos nacionales
- Abonos orgánicos
- Abonos órgano-minerales
- Otros abonos y productos especiales
- Enmiendas calizas
- Enmiendas orgánicas
- Otras enmiendas

A continuación, de acuerdo con la clasificación mostrada previamente, se hará una descripción de los tipos de fertilizantes más comunes que se pueden encontrar en el mercado, estableciendo las características más relevantes de los mismos.

---

<sup>21</sup> *Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes*  
<https://www.boe.es/boe/dias/2013/07/10/pdfs/BOE-A-2013-7540.pdf>

<sup>22</sup> En el Anexo I del Real Decreto 506/2013 se especifican los productos fertilizantes existentes para cada uno de los 7 grupos generales, incluyendo información sobre la forma de obtención, componentes esenciales y contenido mínimo en nutrientes, entre otras cuestiones.



### 2.4.1.- ABONOS INORGÁNICOS

Según el Real Decreto 506/2013, un abono inorgánico o mineral *"es aquel obtenido mediante extracción o procedimientos industriales de carácter físico químico, cuyos nutrientes declarados se presentan en forma mineral"*. Son sales solubles, altamente concentradas, de fácil y rápida liberación, pero generalmente de corta acción residual. Además, al tener un balance homogéneo de componentes químicos, este tipo de fertilización permite establecer con mayor precisión la dosificación requerida.

Las características de los abonos inorgánicos, definidas por el proceso de fabricación y por la calidad de las materias primas empleadas, son básicamente de tipo físico y químico. La calidad física es de suma importancia ya que condiciona de manera decisiva el manejo, almacenamiento y conservación de los abonos, así como la correcta y homogénea aplicación al campo. Dureza (resistencia a la rotura, al impacto), fluidez (mide el grado de aglomeración), granulometría, humedad y densidad son algunos de los factores físicos más relevantes a tener en cuenta en la manipulación de abonos inorgánicos. En relación a las características químicas, éstas están definidas por los nutrientes que contienen los fertilizantes, la concentración y la forma química en la que ese nutriente se encuentra presente en cada producto, o lo que es lo mismo, su asimilabilidad por parte del cultivo.

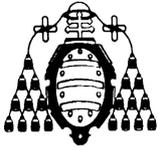
Tradicionalmente los fertilizantes inorgánicos se pueden presentar en forma sólida o líquida, clasificándose en los siguientes grupos: nitrogenados, fosfatados, potásicos y compuestos<sup>23</sup>.

#### Abonos NITROGENADOS:

Dentro de este grupo los abonos nítrico amoniacales son uno de los fertilizantes más utilizados en agricultura debido a que reúnen las ventajas de contener nitrógeno nítrico, de disponibilidad inmediata, y nitrógeno amoniacal, de acción más prolongada ya que debe sufrir el proceso de nitrificación. No es necesario proceder al enterramiento de estos

---

<sup>23</sup> Referencia: *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*, MAPAMA, 2009.



abonos porque son muy solubles, y con un riego periódico es suficiente para que alcancen las raíces de los cultivos.

La urea, es por orden de importancia, el segundo fertilizantes más empleado. Se presenta en dos formas con características diferenciadas: la urea granulada para la aplicación al suelo, y la urea cristalina, completamente soluble y no corrosiva, especialmente indicada para su aplicación foliar y uso en fertirrigación.

Por otro lado el sulfato amónico se presenta en forma de cristales uniformes de muy alta solubilidad y es poco higroscópico. Se emplea en la elaboración de abonos de mezclas presentándose entonces en forma de cristales de mayor tamaño.

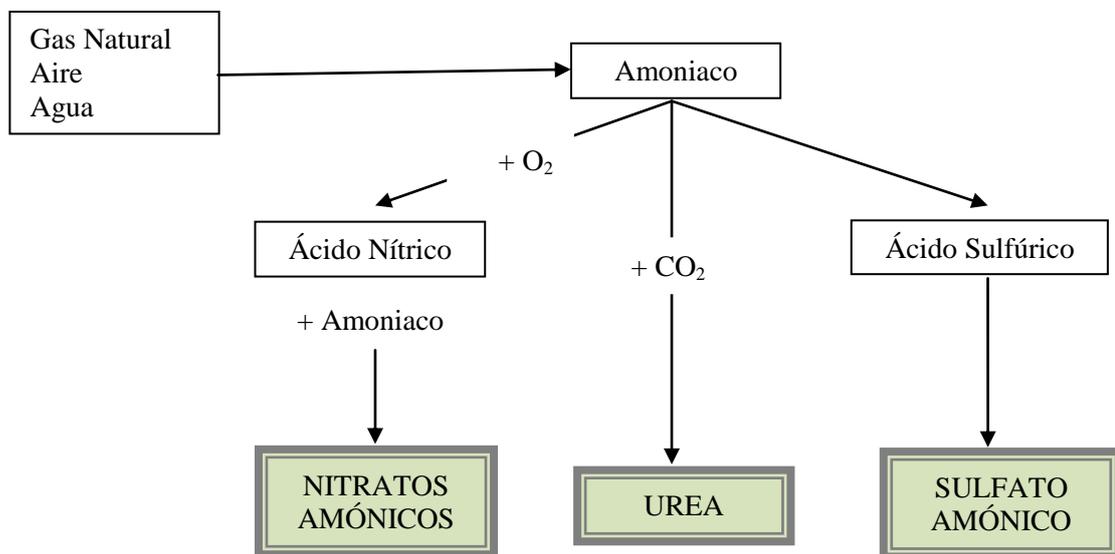


Figura 2.4 - Esquema básico de obtención de fertilizantes nitrogenados. (Elaboración propia)

### Abonos FOSFATADOS:

La roca fosfática, de muy baja solubilidad, es transformada en fertilizante fosfatado mediante el ataque químico de la roca con ácidos minerales, principalmente ácido sulfúrico. Se emplean generalmente como constituyentes de abonos compuestos o de mezcla. Entre los más empleados en agricultura cabe destacar los superfosfatos y los fosfatos amónicos.

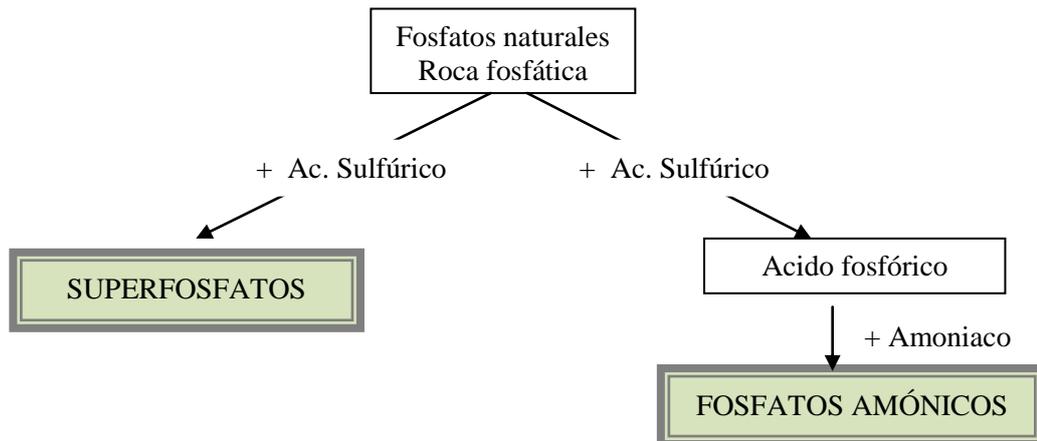
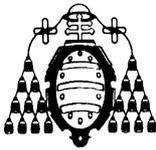


Figura 2.5 - Esquema básico de obtención de fertilizantes fosfatados. (Elaboración propia)

### Abonos POTÁSICOS:

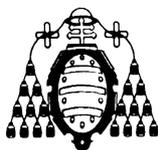
En el proceso de fabricación de fertilizantes potásicos, las sales presentes en la naturaleza se extraen, se muelen y se purifican para facilitar su asimilación por los cultivos. Al igual que el grupo anterior pueden ser utilizados para la fabricación de abonos compuestos o de mezcla.



Figura 2.6 - Esquema básico de obtención de fertilizantes potásicos. (Elaboración propia)

Además de estos tres grandes grupos, existen otros abonos inorgánicos denominados abonos compuestos, los cuales a su vez pueden ser de dos tipos: complejos y de mezcla.

Los abonos complejos son productos que contienen dos o tres de los nutrientes básicos (N, P y K), y además pueden contener nutrientes secundarios y micronutrientes. El proceso de fabricación consiste en hacer reaccionar químicamente las distintas materias primas que los componen y posteriormente, la papilla resultante se granula, se seca, se clasifica y se acondiciona. Con esto se garantiza que cada gránulo del complejo tenga exactamente el mismo contenido de N, P y K, siendo ésta la principal diferencia con respecto a los abonos de mezcla (blending), en los que cada gránulo contiene sólo uno, o como máximo, dos nutrientes.



Los abonos complejos ternarios se conocen comercialmente con la sigla NPK, esta designación se complementa con la expresión cuantitativa del contenido en cada uno de los principales nutrientes, así pues un abono NPK 10-12-15, es un abono ternario que contiene 10% de N, 12% de  $P_2O_5$  y 15% de  $K_2O$ , en total (10+12+15) 37% de materia nutriente o agrícolamente activa. No existe una relación óptima N-P-K, por tanto, ésta debe elegirse en función de las necesidades de cada aplicación, derivadas fundamentalmente de la asociación planta-suelo-clima.

#### 2.4.2.- ABONOS ORGÁNICOS

Según el Real Decreto 506/2013 un abono orgánico es *"un producto cuya función principal es aportar nutrientes para las plantas, los cuales proceden de materiales carbonados de origen animal o vegetal"*.

La mayoría de estos abonos contienen nutrientes cuya concentración es sustancialmente más baja que la de los fertilizantes inorgánicos, además son considerados de acción lenta y progresiva, es decir que la absorción de los nutrientes por parte de las plantas no es inmediata, sino cuando lo demanda de biología de los cultivos, ya que proporcionan nitrógeno orgánico que debe ser transformado en inorgánico por las bacterias del suelo antes de ser absorbido por las raíces.

Esto supone una ventaja importante frente a los fertilizantes inorgánicos, ya que se estima que casi la mitad de los nutrientes aportados a la agricultura de todo el mundo<sup>24</sup>, no son aprovechados debido principalmente a los siguientes factores: acción de lavado de los nutrientes por el agua de riego o de las lluvias, volatilización de los compuestos, inmovilización de los nutrientes por reacciones con componentes del terreno que los insolubilizan, y por último la desnitrificación biológica.

---

<sup>24</sup> Referencia: *Introducción a la Química Industrial*, A. Vian Ortuño, Capítulo 10 La roca fosfática como materia prima.

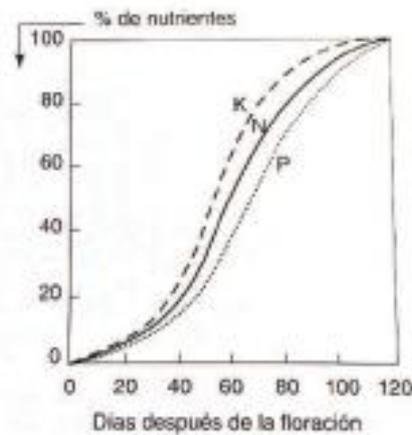
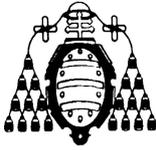


Figura 2.7 - Absorción de nutrientes en función del tiempo. (Fuente: *Introducción a la Química Industrial*, A. Vian Ortuño)

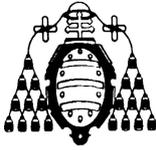
Todos estos factores contribuyen en el aumento del coste de producción y han generado el fenómeno de la "contaminación difusa" de las aguas naturales, especialmente grave en los acuíferos subterráneos y en las masas de agua continentales, al ser determinante del proceso de eutrofización.

En función del contenido en nutrientes principales, se establecen varios grupos de abonos orgánicos: abonos nitrogenados, fosfatados, abonos ternarios NPK y abonos binarios NP y NK, con un total de nueve tipos que dependen del origen de la materia prima orgánica empleada en su elaboración. En los abonos orgánicos, el contenido en nitrógeno orgánico deberá ser al menos un 85% del nitrógeno total, salvo que en los requisitos específicos del tipo se dispongan otros valores, como es el caso del abono NPK de origen animal cuyo límite se establece en un 50%.<sup>25</sup>

A modo de resumen se recoge en las siguientes figuras las principales ventajas y desventajas de los dos tipos de fertilización vistos hasta el momento: INORGÁNICA / ORGÁNICA

---

<sup>25</sup> Referencia: Real Decreto 506/2013, Anexo I (grupo 2 abonos orgánicos) y Anexo V (criterios aplicables a productos fertilizantes elaborados con residuos y otros componentes orgánicos).

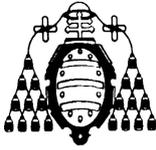


ABONOS INORGÁNICOS	VENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ En general son solubles y esto permite que los nutrientes estén disponibles rápidamente para las plantas.</li><li>▪ Permiten aproximar la dosis de cada nutriente a los requerimientos del terreno y de los cultivos.</li><li>▪ Capacidad de proporcionar mayor cantidad de nutrientes en menor volumen de material fertilizante.</li></ul>	
DESVENTAJAS	
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Si se emplean de manera indiscriminada e inadecuada, pueden constituirse en contaminantes del suelo y del agua.</li><li>▪ Consumo elevado de energía durante el proceso de fabricación.</li><li>▪ Escaso rendimiento en la captación de abonos inorgánicos por parte de los cultivos.</li><li>▪ Acidifican el suelo lo que repercute negativamente en la fertilidad del mismo.</li></ul>	

Figura 2.8 - Características principales de los abonos inorgánicos (*Elaboración propia*)

ABONOS ORGÁNICOS	VENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Son productos que proceden de materiales renovables.</li><li>▪ Aumentan la fauna bacteriana del suelo y aportan materia orgánica al mismo, a la vez que lo nutren.</li><li>▪ Debido a su origen orgánico, son más respetuosos con el medio ambiente.</li><li>▪ Permiten una liberación lenta de los nutrientes según las necesidades momentáneas de las plantas</li></ul>	
DESVENTAJAS	
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Su concentración en nutrientes no es elevada por lo que se requieren mayores cantidades de abono para satisfacer la demanda nutricional de los cultivos.</li><li>▪ Pueden ser fuente de patógenos si no se tratan adecuadamente antes de su uso como fertilizante.</li></ul>	

Figura 2.9 - Características principales de los abonos orgánicos (*Elaboración propia*)



### 2.4.3.- ABONOS ORGANO - MINERALES

Siguiendo la definición presente en el Real Decreto sobre productos fertilizantes, un abono órgano - mineral, es *"un producto cuya función principal es la de aportar nutrientes para las plantas, los cuales son de origen orgánico y mineral, y se obtienen por mezcla o combinación química de abonos inorgánicos con materiales carbonados de origen animal o vegetal o abonos orgánicos"*.

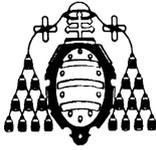
De acuerdo con su contenido en nutrientes principales, y su forma de presentación, sólidos o líquidos (solución o suspensión), se contemplan nueve grupos de abonos órgano-minerales con un total de veinticinco tipos diferentes: nitrogenados, ternarios NPK (sólidos y líquidos) y binarios NP, NK y PK.

La principal ventaja de este tipo de fertilizante es que con una sola aplicación se incorpora al suelo cantidades significantes de materia orgánica y nutrientes, además combinan la liberación rápida de los abonos inorgánicos, para proporcionar nutrientes rápidamente en el momento del abonado; junto con la liberación lenta y acción residual de los abonos orgánicos, aportando el resto de nutrientes cuando las plantas lo necesiten. Pueden fabricarse de forma granulada o pellet, aunque también existen formulaciones líquidas que permiten su aplicación mediante el sistema de riego.

### 2.4.4.- ENMIENDA CALIZA (cálcica o magnésica)

Una enmienda es una materia orgánica o inorgánica, capaz de modificar o mejorar las propiedades y características físicas, químicas o biológicas del suelo. Siguiendo con las definiciones establecidas en el Real Decreto 506/2013, una enmienda caliza es una *"enmienda que contiene calcio y/o magnesio, esencialmente en forma de óxido, hidróxido, carbonato o silicato"*.

Algunas de las funciones que desempeña este tipo de fertilizante son: Formar conglomerados térreos que favorecen la circulación del aire y del agua a través de los suelos compactos, permiten mantener o aumentar el pH del suelo según las características



del mismo, participa en la descomposición de la materia orgánica, actúan sobre varios fertilizantes minerales, impidiendo su arrastre por las aguas de infiltración.

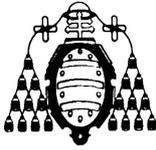
#### 2.4.5.- ENMIENDA ORGÁNICA

Según la legislación vigente, es *"una enmienda procedente de materiales carbonados de origen vegetal o animal, utilizada fundamentalmente para mantener o aumentar el contenido en materia orgánica del suelo"*.

La normativa reguladora de los productos fertilizantes contempla varios tipos de enmiendas orgánicas para las que, dependiendo de la materia prima utilizada en su elaboración, se exigen ciertos contenidos mínimos en nutrientes. Dentro de este grupo, las enmiendas orgánicas más empleadas son:

- **ENMIENDA HÚMICA:** Son compuestos de color amarillento a negro, amorfos, muy polimerizados, con elevado peso molecular y de naturaleza coloidal. Su importancia radica en la aportación directa al suelo de compuestos húmicos, que proceden de la transformación de productos de origen animal o vegetal o por tratamiento de leonardita, lignito o turba, ligados al proceso de formación del carbón; el contenido mínimo en materia orgánica total debe ser del 25%.
- **COMPOST:** Se trata de un producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aerobia, bajo condiciones controladas, de material biodegradable (restos vegetales o de poda, hierba cortada o estiércol). Los principales factores que van a influir en la elaboración del compost, y por tanto en su calidad final, son esencialmente, la naturaleza de los materiales biodegradables y de los microorganismos necesarios en el proceso, el tamaño de partícula, la temperatura y el pH. Según el origen de la materia prima, el contenido mínimo en materia orgánica total es diferente, será del 40% para compost vegetal y del 35% para compost de estiércol, según lo estipula la legislación vigente.

Existe una variante a este proceso que se denomina VERMICOMPOST, se trata de un producto estabilizado obtenido a partir de materiales orgánicos, por digestión con lombrices, bajo condiciones controladas.



- **TURBA:** Es un material procedente de la degradación bioquímica de materiales vegetales acumulados en medios anaeróbicos o semi-anaeróbico (turberas). En la normativa se contemplan dos tipos de turbas según las especies vegetales de que proceden: turba de musgo y herbácea. Ambas se emplean para la recuperación de suelos degradados, como soporte general de los mismos, como materia prima para la fabricación de sustratos y como enmienda orgánica natural en general.

## 2.5.- DIGESTIÓN ANAEROBIA

Una vez analizado el marco general en cuanto a las exigencias necesarias para el desarrollo de los cultivos (nutrientes y suelo agrícola), así como el abanico de posibilidades que existe en el mercado acerca de abonos comerciales, el siguiente paso consiste en describir el proceso a través del cual se obtienen los productos fertilizantes objetos de estudio del presente documento (ESTRUVITA / FASE SÓLIDA): el proceso de digestión anaerobia.

La digestión anaerobia o biometanización es un proceso biológico que se da en ausencia de oxígeno a través de diferentes etapas en las que van interviniendo un grupo heterogéneo de microorganismos, los cuales transforman la fracción más degradable de la materia orgánica en biogás (compuesto formado en su gran mayoría por metano y dióxido de carbono, aunque también incluye otros gases en menor proporción como vapor de agua, sulfuro de hidrógeno, entre otros). Los compuestos de más difícil digestión van a conformar el digestato.

De forma general, se identifican cinco grandes poblaciones bacterianas, las cuales actúan catalizando cuatro etapas consecutivas: Hidrolítica, acidogénica, acetogénica y metanogénica; el siguiente esquema recoge de forma resumida las fases de la fermentación anaerobia indicando con un código de colores las bacterias responsables de los procesos:

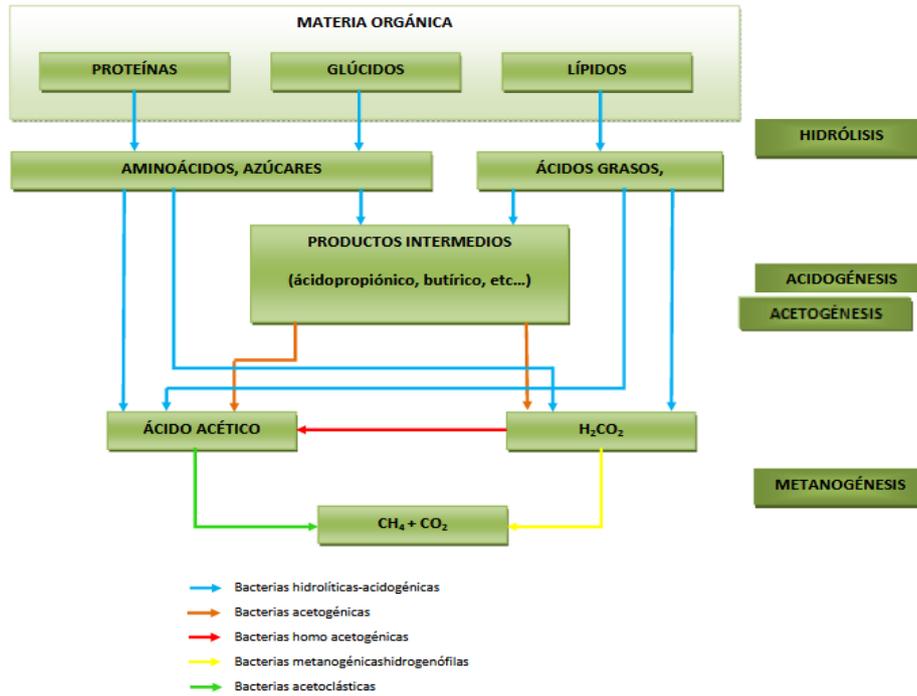
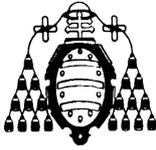


Figura 2.10 - Esquema de la fermentación anaerobia (Fuente: Estudio técnico- económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia, Ana María González Cabrera 2014)

La naturaleza y composición química del residuo que entra en el digestor va a condicionar la composición cualitativa de la población bacteriana que va a estar presente en cada etapa. El tratamiento de dos o más residuos mediante esta técnica se denomina co-digestión anaerobia; permite aprovechar la complementariedad de la composición de los residuos, por ejemplo una combinación de deyecciones ganaderas (baja concentración de materia orgánica pero elevado contenido de micro y macronutrientes) juntos con residuos alimentarios (ricos en carbohidratos, proteínas y grasas y con una alta proporción de materia orgánica biodegradable y alta relación C/N).

Para comprender mejor esta técnica se muestra a continuación un esquema genérico del proceso de digestión anaerobia, indicando el producto principal que se obtiene en el mismo, así como el subproducto digestato; además se ofrecen las posibles actuaciones que se pueden realizar con dichos materiales:

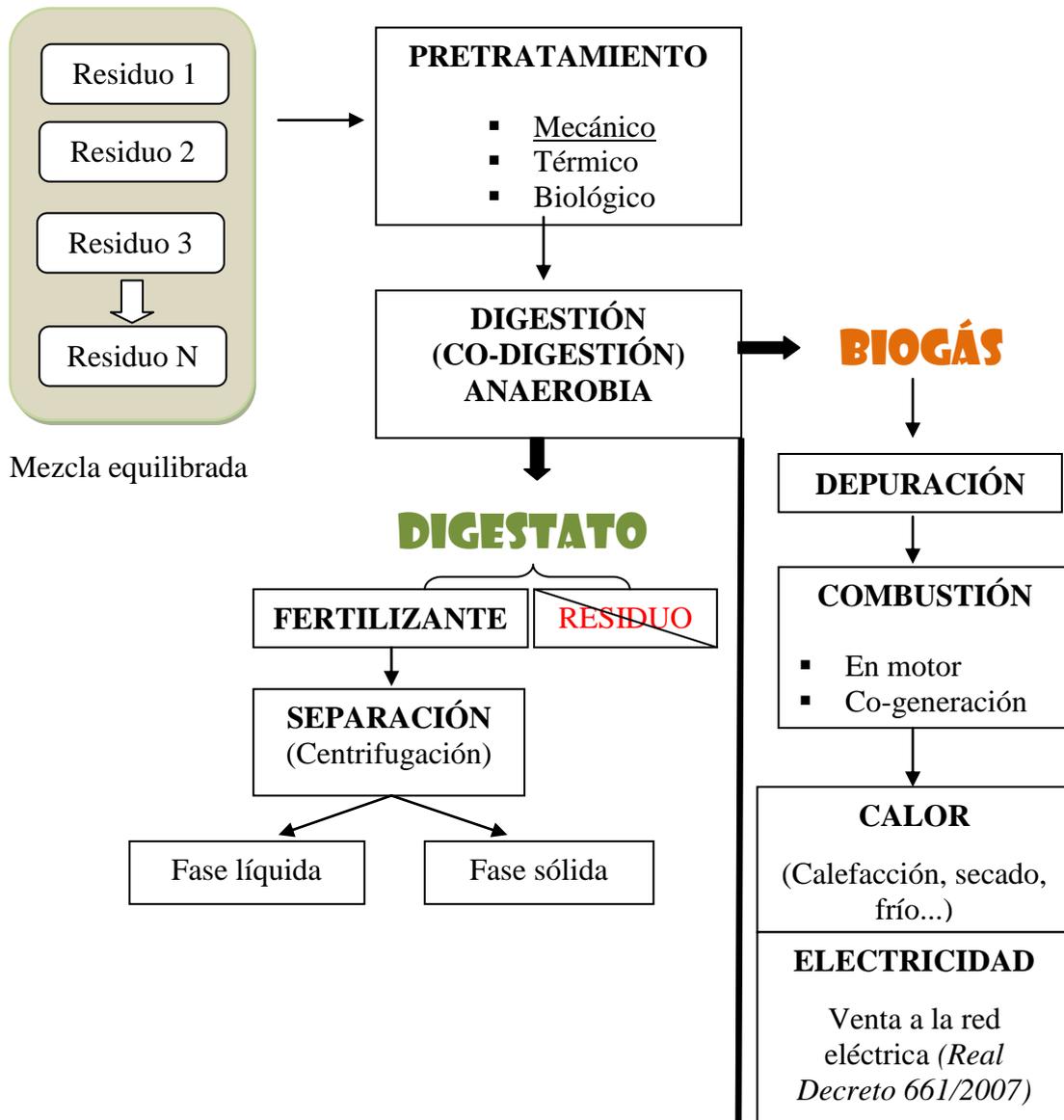
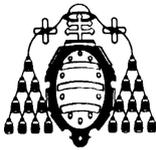
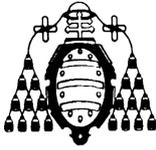


Figura 2.11 - Diagrama de flujo de un proceso de digestión anaerobia (biogás / digestato).  
(Elaboración propia)

Los productos que se estudian en esta investigación se han obtenido dentro del marco de un proyecto de investigación financiado por la empresa ALIMERKA, S.A, y que se está desarrollando en los laboratorios del Grupo de Ingeniería Ambiental, en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. En dicho proyecto se estudia el proceso de digestión anaerobia aplicado a los residuos procedentes de los supermercados y de la plataforma



logística de dicha empresa, los cuales contienen un importante porcentaje de residuos frescos de pescadería y carnicería, ambos catalogados como Sandach tipo III<sup>26</sup>.

Estos residuos antes de ser introducidos en el reactor, han sufrido un proceso mecánico de trituración, como adecuación de los mismos para que se lleve a cabo de forma satisfactoria la digestión anaerobia. Un digestor continuo ha sido el que se ha utilizado para la obtención de biogás junto con el subproducto digestato bruto. En la siguiente fotografía se muestra la planta piloto (reactor CSTR) empleada en la digestión anaerobia:

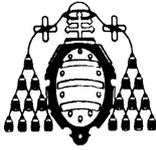


Fotografía 2.1 - Reactor de mezcla perfecta empleado en la digestión anaerobia de residuos de supermercado.

Este tipo de digestores presentan un flujo continuo de biomasa activa en su interior, concretamente se trata de un reactor de mezcla completa, constituye la tecnología más clásica para el tratamiento de todo tipo de residuos orgánicos semi-sólidos. La biomasa se elimina periódicamente a medida que lo hace el residuo orgánico digerido (DIGESTATO). Esta mecánica de funcionamiento no permite una alta concentración de bacterias en el

---

<sup>26</sup> En el apartado 2.5.4.- *MARCO NORMATIVO VIGENTE*, se describirán los subproductos Sandach.



interior del digestor y, por tanto, la producción de biogás por unidad de volumen del digestor es reducida.

### 2.5.1.- BIOGAS A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

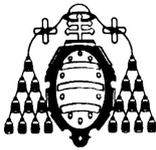
La valorización energética es, en muchas ocasiones, una alternativa necesaria para optimizar la explotación de los residuos/subproductos agroalimentarios. Además el interés por convertir dichos materiales en fuentes de energía renovable ha aumentado notablemente en los últimos años ante la subida del precio del petróleo y las perspectivas de futuro a este respecto.

Existen una gran variedad de técnicas de valorización energética que son aplicables en función del tipo de residuo o subproducto a valorizar. Se clasifican en métodos termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), métodos químicos (producción de biodiesel mediante transesterificación), y métodos bioquímicos (producción de bioetanol mediante fermentación alcohólica y producción de biogás a través de la fermentación o digestión anaerobia). Los métodos termoquímicos suelen requerir sustratos de poca humedad, lo que restringe su uso en muchas ocasiones, ya que los subproductos de la industria agroalimentaria suelen presentar un elevado contenido en agua. La producción de biodiesel y bioetanol requiriere un tipo de residuo muy concreto, en el primer caso con alto contenido en grasas y cierto grado de pureza, y para el bioetanol, residuos con elevado contenido en hidratos de carbono y almidón<sup>27</sup>.

A diferencia de las alternativas mencionadas con anterioridad, la producción de biogás de origen agroalimentario o agroindustrial admite residuos de elevada humedad y de muy distinta composición y procedencia. La generación de biogás no solo supone la obtención de una energía renovable que permite la valorización de residuos, sino que además supone grandes ventajas ambientales como la reducción de emisiones de gases efecto invernadero.

---

<sup>27</sup> Referencia: *Valorización energética: producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales*, AINIA, Parque Tecnológico de Valencia.



Estos residuos/subproductos agroalimentarios a los que se refieren los párrafos anteriores es lo que se conoce como biomasa, ésta representa en la actualidad dos tercios de las energías renovables en Europa y se espera que la bioenergía desempeñe un papel clave en la consecución de los ambiciosos objetivos aprobados por la directiva de energías renovables (Directiva 2009/28/CE)<sup>28</sup> con la que se pretende abastecer, como mínimo, un 20% de la electricidad generada para el año 2020, cuando actualmente la cuota es de aproximadamente del 8,5%.<sup>29</sup>

A nivel nacional se deben desarrollar normativas de apoyo a las instalaciones de producción de biogás en sectores con un alto potencial sin explotar, como lo es el agroindustrial. En España gran parte del biogás tiene su origen en los vertederos procedente de residuos municipales, seguido del biogás que se genera en el proceso de digestión anaerobia de lodos de depuradoras urbanas e industriales, y en último lugar se encuentra el proceso de digestión anaerobia o codigestión de los residuos agroalimentarios / ganaderos / agrícolas para la producción de biogás; los datos quedan reflejados en el siguiente diagrama:

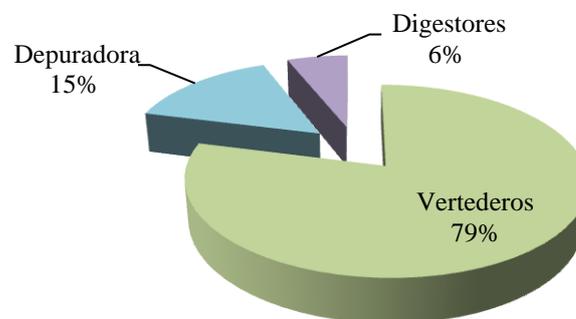
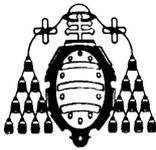


Figura 2.12 - Fuentes de generación de biogás (*Fuente: Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España, PROBIOGÁS 2009*).

Cabe destacar que España ocupa el cuarto puesto en cuanto a la producción de biogás se refiere dentro de la Unión Europea, ranking encabezado por Alemania, país que representa alrededor del 40% de la producción total europea. Los principales sustratos

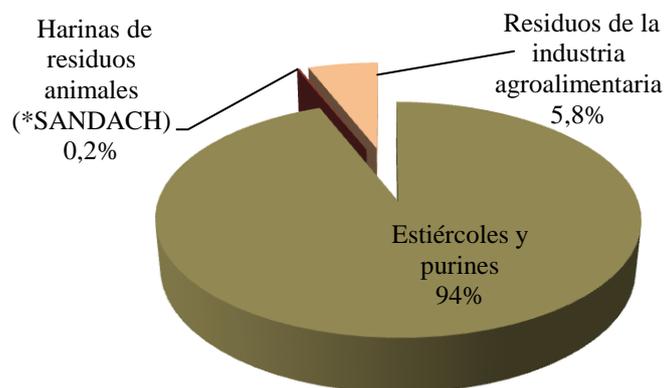
<sup>28</sup> Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables <https://www.boe.es/doue/2009/140/L00016-00062.pdf>

<sup>29</sup> Referencia: *El sector del Biogás Agroindustrial en España*, Madrid septiembre 2010.



empleados por Alemania para la generación de esta energía renovable son residuos agrícolas y cultivos energéticos (fundamentalmente cereales) gracias a la existencia de una prima para fomentar su uso en la Ley de energías renovables (prima NaWaRo), además dispone de normas básicas que fijan límites máximos y condiciones de operación para certificar la calidad para el uso agrícola de los digeridos producidos mediante el tratamiento anaerobio de residuos orgánicos (*RAL-Quality Assurance Systems*).<sup>30</sup>

La producción total de subproductos agroindustriales susceptibles de ser empleados en la producción de biogás de digestión alcanza la cifra de 79 millones de toneladas por año, repartidos en los grupos que se muestran en la figura; esto supondría un potencial de generación de biogás de 1.930 millones de m<sup>3</sup>/año.<sup>31</sup>



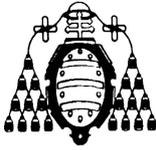
\* SANDACH: Subproductos animales no destinados al consumo humano

Figura 2.13 - Materias primas (subproductos agroindustriales) en la generación de biogás.

Queda demostrado que la producción de biogás a partir de subproductos agroalimentarios es un punto clave que permite cumplir las tendencias legislativas tanto en el ámbito de las energías renovables, como en el ámbito de gestión de los residuos.

<sup>30</sup> Referencia: *El sector del Biogás Agroindustrial en España*, Madrid septiembre 2010 / *Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometanización*, PROBIOGÁS 2011.

<sup>31</sup> Referencia: *Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometanización*, PROBIOGÁS 2011.



### 2.5.2.- ESTRUVITA Y FASE SÓLIDA

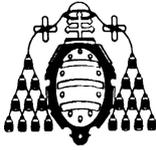
A pesar de que el producto principal del proceso de digestión anaerobia es el biogás, tan importante como maximizar el rendimiento del biogás es obtener un digestato que tenga un valor potencial y que pueda ser aprovechable en el marco del sistema objeto de estudio. Hay que tener en cuenta que este subproducto es similar en volumen al ocupado por los residuos de partida, aunque también cabe destacar que presenta ventajas significativas.

El digestato tiene una composición homogénea, tanto más cuanto mayor sea el tiempo de retención dentro del reactor. Además, gracias a las transformaciones que suceden durante la digestión anaerobia, no presenta olor desagradable ni emite compuestos orgánicos volátiles. Por lo tanto, el proceso consigue una cierta estabilización de los residuos, evitando así uno de los impactos negativos más notable de éstos, como es la emisión de olores desagradables.

En cuanto al valor agronómico del digestato, es importante destacar que el contenido en nutrientes (NPK) del sustrato se mantiene estable en el subproducto tras la digestión, además de presentar un alto grado de mineralización, que se traduce en una mayor disponibilidad para el cultivo en cuestión.

Cabe destacar que a la hora de determinar la calidad del digerido, además de tener en cuenta el incremento de la estabilidad del mismo, su contenido en nutrientes y materia orgánica, hay que tener presente que los materiales digeridos pueden contener productos tóxicos de naturaleza orgánica tales como residuos de plaguicidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, etc., así como otros contaminantes en forma de impurezas de tipo físico (plástico, vidrio, metales, etc.); una correcta separación en origen de la materia prima empleada evita este tipo de impurezas.

Lo que hace interesante el trabajo presentado en esta investigación, es que también consigue obtener a partir del digestato, unos productos comercializables como fertilizantes agrícolas.



Fotografía 2.2 - Muestra de digestato

Aparentemente el digerido bruto presenta un color marrón oscuro, aunque no opaco, como se puede apreciar en la fotografía anterior. La valorización agrícola de los digeridos se centra fundamentalmente en dos cuestiones:

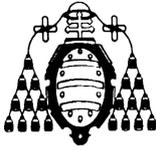
- Empleo directo del digerido bruto como fertilizante líquido (dado su alto contenido en agua), de ser así se podría aplicar simultáneamente el agua y el fertilizante a través del sistema de riego, lo que se conoce como fertirrigación, si bien este método está limitado debido al contenido en partículas que pueda presentar el digerido, las cuales pueden obstruir los conductos de riego. Otra opción sería formar una pasta de tierra más el digerido bruto, formando la base sobre la que se desarrollarán los cultivos. Esta última alternativa es la que se ha seguido en la investigación anterior para probar el poder fertilizante del digestato bruto<sup>32</sup>.
- Someter al digerido bruto a un proceso de separación, para aumentar el aprovechamiento de sus propiedades fertilizantes.

Esta segunda alternativa es a través de la cual, se han obtenido los dos materiales fertilizantes objeto de estudio del presente documento (estruvita y fase sólida).

El efluente obtenido tras la etapa de digestión anaerobia se somete a un proceso de centrifugación consiguiendo así la separación del mismo en dos fases diferenciadas, a

---

<sup>32</sup> Referencia: Pruebas de fertilización con digestato obtenido en la digestión anaerobia de residuos de supermercado. Grado en Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, C. Pérez Mata, 2016.



razón de 25% de fase sólida y 75% de fase líquida aproximadamente. Esta separación sólido - líquido no modifica el contenido de los componentes presentes en el digerido de partida, lo que se consigue es una redistribución de los constituyentes y, por tanto, mejora la capacidad de gestión de las fases obtenidas. En este sentido, la fracción sólida obtenida se podría emplear directamente como fertilizante o enmienda orgánica.

El aspecto que presenta la fase sólida es el que se muestra en la siguiente fotografía, a la derecha el sólido sin manipulación y a la izquierda el sólido molido en un mortero.



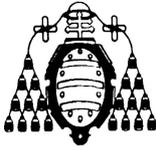
Fotografía 2.3 - Muestra de fracción sólida.

Cabe mencionar que la obtención de un producto sólido requiere un menor coste económico en cuanto al almacenamiento y transporte del mismo, en comparación con un material líquido. Además el beneficio obtenido por la venta de este tipo de subproductos es mayor en el caso del digerido seco, precio en torno 5-30 euros/tonelada, que en el caso del digestato bruto (húmedo) donde el precio oscila entre 0-8 euros/tonelada<sup>33</sup>. Precios, que por otro lado, son bajos, y esto puede ser debido a la falta de legislación comunitaria en lo relacionado a la producción y comercialización de este tipo de productos. También es importante tener en cuenta que la calidad de la materia prima de partida, así como del subproducto generado tras la digestión va a influir significativamente en el precio final de venta.

En relación a lo anterior, la fracción líquida se manipulará para conseguir un producto sólido, conocido con el nombre de estruvita. Este mineral fue descubierto en 1846 cerca de

---

<sup>33</sup> Referencia: *End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals*, H. Saveyn / P. Eder, Sevilla, 2014.



Hamburgo (Alemania), se trata de un sólido cristalino blanco en concentraciones molares iguales de magnesio, amonio y fosfato. Su presencia se ha manifestado en el lodo residual y su formación es asociada con procesos anaerobios y procesos de pos-digestión.

Las ventajas agrícolas que presenta este mineral son las que se indican a continuación<sup>34</sup>:

- Fertilizante que aporta fósforo, nitrógeno y magnesio en conjunto.
- Es de liberación lenta, por lo que disminuye el riesgo de contaminación de acuíferos y aumenta el grado de aprovechamiento por parte del vegetal.
- A penas contiene metales pesados, por lo que la posibilidad de contaminación del terreno o de presencia de estos compuestos en los cultivos es baja.
- Se puede emplear como método de eliminación de fósforo de la corriente principal, siendo más barato que los métodos convencionales existentes.
- Se puede producir de forma controlada en una EDAR (Estación de Depuración de Aguas Residuales), reduciendo los costes de mantenimiento de la misma.

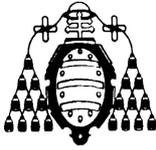


Fotografía 2.4 - Muestra de estruvita.

Para lograr obtener la estruvita tal cual se muestra en la fotografía anterior es necesario añadir fuentes externas de magnesio y de fósforo, al ser el digestato bruto de partida deficitario en estos componentes, hasta alcanzar la relación óptima de N/P/Mg.

---

<sup>34</sup> Referencia: *Estruvita, el problema que se convirtió en solución*, E. Rama, 2014.



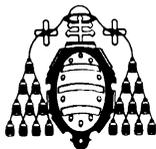
El siguiente paso consiste en una agitación de la mezcla para lograr un producto homogéneo. Una vez conseguido se para la agitación y se deja precipitar durante doce horas. Al cabo de este tiempo se obtiene una fase líquida clarificada que se puede verter, sin tratamiento previo, a la red de alcantarillado, y paralelamente se forma un precipitado blanco (estruvita) en una riqueza superior al 98%. Con el fin de obtener un sólido manipulable, el sólido precipitado se somete a un proceso de secado cuyas condiciones de operación son 24h a 55°C. De esta forma se obtiene finalmente la estruvita, fertilizante listo para su empleo como abono en campos de cultivo.

Para lograr el objetivo de este proyecto, comparar el poder fertilizante de productos derivados del digestato, tanto en la investigación anterior con el dígido bruto, como en la investigación que se desarrolla en el presente documento para la estruvita y fase sólida, los materiales de partida han sido los tres tipos de fertilizantes, pero se ha considerado importante describir brevemente las características principales y el proceso de obtención de los mismos.

### **2.5.3.- ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS DE LA ESTRUVITA Y FASE SÓLIDA**

Una vez obtenidos los fertilizantes empleados en el proyecto, se ha realizado la caracterización de los mismos, los resultados obtenidos se recogen en el Apéndice 8.1 del presente documento. Cabe indicar que la obtención de esta información no pertenece al alcance de la investigación presentada, sino que se ha empleado como dato de partida para el cálculo de las dosificaciones de los abonos (*Capítulo 3. Metodología de trabajo*).

A continuación se muestra la composición de la estruvita, fase sólida, así como del digestato bruto (datos de la investigación anterior) expresada en las unidades en las que se recogen en la normativa referente a productos fertilizante.



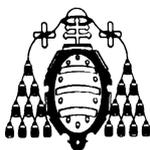
DIGESTATO		
Parámetro	Valor	
Materia seca (%)	5,4	
<b>Nutrientes</b>	g/kg	% masa
N total	2,1	0,21
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5	0,5
K <sub>2</sub> O	10	1
<b>Metales</b>	mg/kg	
Cd	1,5	
Cr	5,8	
Cu	6,1	
Ni	18,4	
Pb	62,2	
Zn	12,1	
As	0,2	
Hg	0,5	

ND\*: no detectado

ESTRUVITA		
Parámetro	Valor	
Densidad (kg/L)	1,61	
Humedad (%)	36,89	
N amoniacal (mg/kg)	53,38	
Nitratos (mg/kg)	2,95	
Nitritos (mg/kg)	1,28	
Carbono orgánico (% masa)	5,09	
<b>Nutrientes</b>	g/kg	% masa
N total	57,2	5,72
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	289,5	28,95
K <sub>2</sub> O	0,00034	0,000034
<b>Metales</b>	mg/kg	
Cd	ND*	
Cr	ND*	
Cu	0,013	
Ni	0,083	
Pb	3,566	
Zn	ND*	
As	ND*	
Hg	ND*	
Fe	5,288	
Al	1,076	
Ca	ND*	
Na	ND*	
Mg	61,603	
Co	0,362	
Mn	0,319	

FASE SÓLIDA		
Parámetro	Valor	
Sólidos Totales (g/kg)	333,21	
Sólidos Volátiles (g/kg)	152,11	
N amoniacal (mg/kg)	39	
Carbono orgánico (% masa)	16,6	
<b>Nutrientes</b>	g/kg	% masa
N total	0,34	0,034
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,4	0,14
K <sub>2</sub> O	0,6	0,06
<b>Metales</b>	mg/kg	
Cd	10,68	
Cr	11,28	
Cu	56,14	
Ni	44,85	
Pb	98,21	
Zn	123,53	
As	ND*	
Hg	ND*	
Fe	889,56	
Al	7,72	
Ca	1696,62	
Na	1072,06	
Mg	340,65	
Co	40,91	
Mn	69,13	

Tabla 2.3 - Composición agronómica del digestato bruto, estruvita y fase sólida.



*NOTA: Todas las tablas y/o figuras que se expongan en este documento, en las que no se indique la fuente de obtención de la misma, es debido a que son de elaboración propia.*

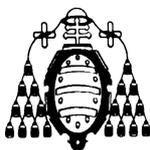
Es necesario mencionar que no existe aun legislación española vigente y específica ni para el digerido bruto ni para la estruvita, que permita regular los límites asociados a determinados parámetros agronómicos, tales como el contenido mínimo en nutrientes o el contenido en materia orgánica; y poder así justificar legalmente el empleo de estos materiales dentro de la industria de los fertilizantes.

La necesidad de ampliar la investigación anterior, centrada exclusivamente en el digestato bruto, nace al analizar el contenido en nutrientes del mismo. Atendiendo a la clasificación de los grupos de fertilizantes establecidos en el Real Decreto 506/2013, ya mencionada con anterioridad en el presente documento, (apartado 2.4.- *TIPOS DE FERTILIZANTES*) y teniendo en cuenta que el digerido se trata de un efluente líquido, cuya composición depende directamente de la alimentación al digestor y de las condiciones del proceso de digestión, en principio podría estar incluido en los grupos de: abonos orgánicos / abonos órganos-minerales / enmiendas orgánicas, aunque no cumple estrictamente con todos los requisitos que la ley exige para cada grupo, y esto es debido principalmente a su bajo contenido en nutrientes.

Una posible solución a este problema sería la separación de fases del digestato bruto. Analizando los datos anteriores se observa cómo tras la centrifugación, los nutrientes del digerido quedan fijados en la fracción líquida, ya que el contenido de N/P/K, en las formas químicas en que se expresan, es muy bajo para el caso de fase sólida.

La fracción líquida a la que se hace referencia es la base en la obtención de la estruvita, observando los valores de la tabla se comprueba cómo este mineral se ajusta a su definición ya que el nitrógeno, fósforo y magnesio, son los elementos mayoritarios presentes en su composición.

A pesar de que en la síntesis de la estruvita, el origen de la materia prima es orgánico (restos de alimentos), su elaboración requiere de un proceso químico y de la adición de reactivos para su obtención, por este motivo este tipo de abono se clasificaría como un fertilizante inorgánico. El problema que presenta este producto es que su composición no



se ajusta a ninguno de los tipos de fertilizantes inorgánicos recogidos en el Real Decreto 506/2013. Únicamente se podría asimilar al abono nitrogenado mixto, (incluido dentro del grupo de abonos inorgánicos nitrogenados) cuyas características se muestran en la siguiente tabla:

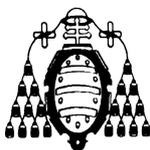
Nº	Denominación del tipo	Información sobre la forma de obtención y los componentes esenciales	Contenido mínimo en nutrientes (% en masa)	Otra información sobre la denominación del tipo o del etiquetado	Contenido en nutrientes que debe declararse y garantizarse
07	Abono nitrogenado mixto	Producto obtenido por combinación química o por mezcla de abono CE nitrogenados simples, con excepción de la urea con nitrato amónico y aquellos que sean incompatibles químicamente	- 20% de N total - 4% de N, al menos, en dos de las siguientes formas: nítrica, amoniacal o ureica - Contenido máximo en biuret <sup>35</sup> : 0,8%	Nombre de los abonos CE utilizados en su obtención	- Nitrógeno total si supera el 1% - Nitrógeno nítrico - Nitrógeno amoniacal - Nitrógeno ureico

Tabla 2.4 - Características del abono nitrogenado mixto. (Fuente: Anexo I, Real Decreto 506/2013)

No obstante cabe destacar, que la estruvita no cumple con todos los requisitos exigibles a este tipo de fertilizantes, ya que solo contiene nitrógeno en forma amoniacal. A pesar de esto, dado que su contenido nutricional es elevado y el contenido en metales que presenta es bajo, se ha decidido probar el poder fertilizante de la estruvita aplicado al cultivo de la Lechuga Batavia.

En el caso de la fase sólida, dadas sus características agronómicas, se podría incluir dentro de los grupos: abono orgánico / enmienda orgánica; sin embargo su bajo contenido en nutrientes hace que no sea posible enmarcarla dentro ninguno de los tipos recogidos en la legislación vigente. Para probar su efecto fertilizante, se requeriría una gran cantidad de fase sólida, a expensas de cumplir con las exigencias nutricionales de la Lechuga Batavia,

<sup>35</sup> Biuret: Reactivo que detecta la presencia de proteínas y péptidos, puede estar presente en los fertilizantes que contienen urea y en cantidades elevadas puede ser tóxico para las plantas.

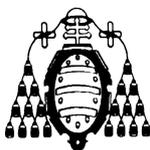


esto hace que no sea una opción viable desde un punto de vista técnico. Sin embargo, para tratar de valorizar este producto y evitar que se convierta en un residuo, lo que se ha decidido es probar el efecto fertilizante de la MEZCLA = ESTRUVITA + FASE SÓLIDA, aprovechando el contenido nutricional de la primera y el aporte de carbono orgánico de la segunda. Esta mezcla, podría quedar definida como abono órgano-mineral, según la clasificación del Real Decreto 506/2013, siempre y cuando se ajusten las cantidades de ambos materiales para que la mezcla resultante cumpla con las especificaciones de alguno de los grupos incluidos dentro de este tipo de fertilizantes.

Según los datos disponibles hasta el momento, sin realizar cálculos matemáticos, la mezcla no podría pertenecer a los grupos cuya apariencia física fuese un líquido, ya que su aspecto es sólido, además el bajo contenido de potasio, tanto de la estruvita como de la fase sólida, hace que la mezcla entre ambos no alcance el contenido mínimo en este nutriente en los grupos: NPK sólidos, NK sólidos y PK sólidos. Los grupos restantes, a los que sí podría pertenecer la mezcla son: Nitrogenados o NP sólidos. Las características agronómicas de los tipos de fertilizantes incluidos dentro de estos dos grupos, susceptibles de encajar con las características de la mezcla, se describen en la siguiente tabla:

Nº	Denominación del tipo	Información sobre la forma de obtención y los componentes esenciales	Contenido mínimo en nutrientes (% en masa)	Contenido en nutrientes que debe declararse y garantizarse
01	Abono órgano-mineral nitrogenado	Producto sólido obtenido por mezcla o combinación de materias o abonos orgánicos y abonos minerales	- N total 10% - N orgánico 1% - C orgánico 8%	- N total y N orgánico - Otras formas de N, si >1% - C orgánico - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> y K <sub>2</sub> O totales, si >1% - Ácidos húmicos, si >1%
01	Abono órgano-mineral NP	Producto obtenido por mezcla o combinación de materiales o abonos orgánicos y abonos minerales	- N + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 8% - N total 2% - N orgánico 1% - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 3% - C orgánico 8%	- N total y N orgánico - Otras formas de N, si >1% - C orgánico - K <sub>2</sub> O total, si >1% - Ácidos húmicos, si >1%

Tabla 2.5 - Características de los abonos órgano-minerales nitrogenado / NP. (Fuente: Anexo I, Real Decreto 506/2013)



Según el contenido nutricional de la estruvita y de la fase sólida se pueden realizar combinaciones entre ambas hasta encontrar la mezcla que se ajusta a los requerimientos legislativos presentes en la tabla anterior.

Estas combinaciones son las que se muestran a continuación, donde se puede observar como las mezclas no pueden incluirse dentro del grupo de órgano-mineral nitrogenado, ya que el contenido de nitrógeno total no alcanza, en ningún caso, el mínimo del 10%. Por otro lado, todas las opciones presentadas cumplen con las especificaciones del abono órgano-mineral NP, a excepción de la mezcla 30% estruvita - 70% fase sólida, ya que su contenido en nitrógeno total no alcanza el 2%.

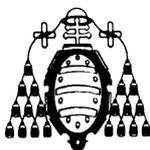
	MEZCLAS				
	50% Estruvita 50% FS	40% Estruvita 60% FS	60% Estruvita 40 % FS	30% Estruvita 70% FS	70% Estruvita 30 % FS
% N total	2,9	2,3	3,4	1,7	4
% C orgánico	10,8	12	9,7	13,1	8,5
% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	14,5	11,7	17,4	8,8	20,3
% N + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	17,4	14	20,9	10,5	24,3

Tabla 2.6 - Contenido en nutrientes de diferentes combinaciones de estruvita y fase sólida.

A la vista de los resultados, se ha decidido probar como fertilizantes las siguientes mezclas:

- Mezcla 1: 50% estruvita - 50% fase sólida
- Mezcla 2: 40% estruvita - 60% fase sólida
- Mezcla 3: 60% estruvita - 40% fase sólida

Cabe indicar que dentro de las mezclas, es la estruvita, el fertilizante que aporta los nutrientes esenciales, tales como nitrógeno y fósforo, en cantidades suficientes como para cumplir con las especificaciones definidas para los abonos órgano-minerales, sin embargo el contenido en carbono orgánico de la estruvita no es suficiente para su inclusión dentro de este grupo, por este motivo se emplea la fase sólida, ya que aporta el carbono orgánico necesario para cumplir con la legislación. La importancia que tiene este compuesto en el suelo agrícola, es que permite determinar la calidad del mismo influyendo en la distribución del espacio poroso, de la humedad disponible y en la capacidad de



movimiento de agua y gases a su través, además de servir como fuente de energía que los cultivos necesitan para su desarrollo.

Además del contenido nutricional es interesante realizar una mención acerca del contenido en metales pesados de los tres tipos de fertilizantes expuestos con anterioridad, concretamente en la tabla 2.3. En el Anexo V del Real Decreto 506/2013 aparecen recogidos los límites máximos de metales pesados que pueden estar presentes en productos fertilizantes elaborados con materias primas de origen animal o vegetal. Estos valores quedan recogidos en la siguiente tabla:

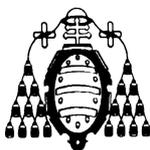
<b>Metal pesado</b>	<b>Intervalo máximo de concentración</b>
	Unidad: mg/ kg de materia seca
Cd	0,7 - 3
Cu	70 - 400
Cr	70 - 300
Zn	200 - 1.000
Ni	25 - 100
Pb	45 - 200
Hg	0,4 - 2,5

Tabla 2.7 - Límite máximo de metales pesados para fertilizantes cuyo origen es animal o vegetal.  
(Fuente: Anexo V, Real Decreto 506/2013)

Comparando estos valores con los obtenidos en el laboratorio para el digestato bruto, (datos tabla 2.3), se observa que el contenido en metales se encuentra por debajo de los límites máximos establecidos en la legislación, cumpliendo la normativa consultada.

Si se analizan los materiales obtenidos a partir del digestato bruto, se observa cómo tras la separación física, los metales pesados se desplazan mayoritariamente a la fase sólida, quedando la fase líquida con un bajo contenido en estos componentes. A pesar de esto, solo el Cadmio presente en la fracción sólida supera el límite máximo establecido en la legislación.

Cabe mencionar que la normativa consultada no establece límites máximos de metales pesados para fertilizantes inorgánicos, como es el caso de la estruvita, aunque



observando los valores de la misma, se aprecia que éstos son muy bajos, incluso en algún caso inferior al límite de detección del equipo de medida.

Para finalizar con este apartado, mencionar que el Anexo V del Real Decreto 506/2013, al que ya se ha hecho referencia en los párrafos anteriores, además del límite máximo de metales pesados, se indica el límite máximo de microorganismos, el cual no se deberá de sobrepasar para los productos fertilizantes de origen orgánico. Se dispone de valores para *Salmonella* y *Escherichia coli*, en el caso de la primera se exige la ausencia de la bacteria en 25 g de producto elaborado, y para la segunda se establece que debe ser inferior a 1.000 NMP (número más probable) por gramo de producto elaborado.

En el estudio presentado no se disponen de datos acerca del contenido en microorganismos de los fertilizantes orgánicos empleados en la investigación, por lo que los límites anteriores solo se muestran a modo informativo.

#### 2.5.4.- MARCO NORMATIVO VIGENTE

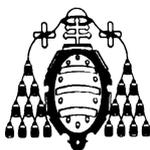
En base al uso que se pretende dar tanto a la estruvita como a la fase sólida, es necesario analizar el marco normativo que les sería de aplicación, así como la legislación aplicable a las materias primas (residuos alimentarios / digestato), a partir de las cuales se obtienen los dos fertilizantes empleados en el proyecto.

##### **Reglamentación referida a productos fertilizantes:**

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la normativa vigente, aplicable a los productos que se pongan en el mercado como abonos y lleven la denominación "abono CE<sup>36</sup>", es el Reglamento (CE) 2003/2003 relativo a los abonos. Éste quedará derogado, a principios del año 2018, por la actual Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo en el que se establecen disposiciones relativas a la comercialización de los productos fertilizantes con el marcado CE.

---

<sup>36</sup> Mercado CE (conformidad europea): Proceso a través del cual el fabricante/importador informa a los usuarios de que el material adquirido cumple con la legislación obligatoria vigente.



La regulación del Reglamento (CE) 2003/2003, todavía vigente, se efectúa a través del Real Decreto 506/2013, sobre productos fertilizantes. Cabe mencionar que existe un documento<sup>37</sup> en el que se recogen modificaciones del Real Decreto anterior, pero que a efectos de la investigación presentada en este proyecto no son relevantes para la misma.

La información recogida en las normativas mencionadas, necesarias para la comprensión y el desarrollo del presente proyecto, ya ha sido descrita con anterioridad en los apartados que se cita a continuación:

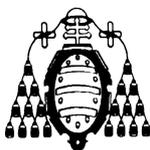
- 2.3.- *COMERCIALIZACIÓN DE FERTILIZANTES*
- 2.4.- *TIPOS DE FERTILIZANTES*
- 2.5.3.- *ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS DE LA ESTRUVITA Y FASE SÓLIDA*

Si bien cabe realizar una mención sobre el contenido del Anexo IV del Real Decreto 506/2013, el cual no se ha comentado con anterioridad. Este anexo recoge, de acuerdo a la lista europea de residuos, los tipos de residuos orgánicos biodegradables permitidos para la elaboración de productos fertilizantes. Estos residuos a los que se hacen referencia, y entre los cuales se encuentra el digestato empleado, son los que se indican a continuación:

- 19. Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos:
  - 19 06 Residuos del tratamiento anaeróbico de residuos:
    - 19 06 03 Licores (digestato) del tratamiento anaeróbico de residuos municipales.
    - 19 06 04 Materiales de digestión del tratamiento anaeróbico de residuos municipales.
    - 19 06 05 Licores (digestato) del tratamiento anaeróbico de residuos animales (salvo lo exceptuado en el Reglamento 1069/2009) y vegetales.
    - 19 06 04 Materiales de digestión del tratamiento anaeróbico de residuos animales (salvo lo exceptuado en el Reglamento 1069/2009) y vegetales.

---

<sup>37</sup> Orden AAA/2564/2015, 27 noviembre, por la que se modifican los anexos I, II, III, IV y VI del Real Decreto 506/2013 <https://www.boe.es/boe/dias/2015/12/03/pdfs/BOE-A-2015-13094.pdf>



### **Reglamentación referida a la gestión de residuos:**

La Ley 22/2011, del 28 julio, de residuos y suelos contaminados<sup>38</sup>, tiene por objetivo regular la gestión de los residuos impulsando medidas que prevengan su generación y mitiguen los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente asociados a su generación y gestión, mejorando la eficiencia en el uso de los recursos todavía disponibles; permite además establecer los criterios de fin de la condición de residuo para ciertos materiales.

La necesidad del análisis de esta normativa es debido a que existe un cierto grado de controversia en lo relativo a la clasificación del digerido como residuo o como subproducto, como consecuencia de la falta de reglamentación española al respecto.

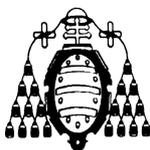
Cabe mencionar que la aplicación de esta Ley recae sobre el digestato bruto, ya que es la corriente secundaria que se obtiene a partir del proceso de digestión anaerobia, empleando residuos orgánicos como materia prima. El objetivo, en los procesos de elaboración de la fase sólida y estruvita, es la obtención de estos materiales como corriente principal, por lo que no habría duda en si calificarlos como subproductos/residuos, ya que se tratan de productos principales.

Conforme al *Artículo 2*, los subproductos animales y sus derivados, cuando sean empleados en una planta de biogás, tal y como ocurre en el caso que nos ocupa, serán sometidos al ámbito de aplicación de esta Ley. Además según el *Artículo 5*, donde se indica el fin de la condición de residuo " se podrá establecer los criterios específicos que determinados tipos de residuos, que hayan sido sometidos a una operación de valorización, incluido el reciclado, deberán cumplir para que puedan dejar de ser considerados como tales, a los efectos de los dispuesto en esta Ley y siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- Que las sustancias u objetos resultantes se usen habitualmente para finalidades específicas.
- Que exista un mercado o una demanda para dichas sustancias u objetos.

---

<sup>38</sup> Ley 22/2011, 28 julio, residuos y suelos contaminados <https://www.boe.es/boe/dias/2011/07/29/pdfs/BOE-A-2011-13046.pdf>



- Que las sustancias u objetos resultantes cumplan los requisitos técnicos para finalidades específicas, la legislación existente y las normas aplicables a los productos.
- Que el uso de la sustancia u objeto resultante no genere impactos adversos para el medio ambiente o la salud.”

El digestato bruto cumple con tres de las cuatro condiciones, arriba indicadas, ya que se emplea en la industria de los fertilizantes como abono de origen orgánico y su utilización no entraña un riesgo para la salud humana o el medio ambiente, siempre que se gestione de manera eficiente. En cuanto al tema legislativo, al no existir regulación específica para este tipo de producto, lo máximo que se puede hacer es cumplir con la normativa vigente, de carácter general, aplicable a todos los fertilizantes de origen orgánico.

En relación a estos criterios, el IPTS<sup>39</sup> (*Institute for Prospective Technological Studies*) ubicado en Sevilla, ha elaborado una propuesta técnica sobre criterios de fin de la condición de residuo para los residuos biodegradables sometidos a tratamiento biológico (compost y digerido), publicada por la Comisión europea en enero de 2014. Concretamente, en el apartado “4.4. *Product quality requirements for compost and digestate*” (Requisitos de calidad de productos para el compost y el digestato) se proponen varios requisitos mínimos de calidad para el digestato,

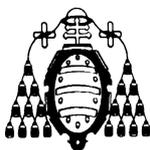
*NOTA: Los datos proporcionados por esta propuesta técnica, se encuentran recogidos en las páginas 141-142, no se han presentado en el presente documento por no ser considerados relevantes para el desarrollo del proyecto.*

### **Reglamentación referida a la protección contra la contaminación por agentes patógenos:**

La palabra Sandach es un acrónimo utilizado para referirse a los "Subproductos Animales No Destinados Al Consumo Humano" y cuyo desarrollo legislativo es reciente. Cuando se habla de un residuo Sandach, se entiende que son cuerpos o partes de animales,

---

<sup>39</sup> IPTS- *End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals*, H. Saveyn / P. Eder, Sevilla, 2014 <http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC87124.pdf>



productos de origen animal u otros productos obtenidos a partir de animales, que no están destinados para el consumo humano por motivos sanitarios o por decisión del operador.

Estos subproductos son generados en la producción primaria, en las industrias de transformación de los alimentos con origen animal y en los establecimientos alimentarios de comercio mayorista y minorista. Durante mucho tiempo y hasta principios del año 2.000 muchos de estos subproductos se empleaban para la alimentación de animales. Sin embargo, en los años 90 ocurrieron varias crisis alimentarias y alertas sanitarias, como consecuencia de un uso indebido de estos materiales, destacando: la enfermedad de las vacas locas o encefalopatía espongiforme transmisible, la presencia de dioxinas en los piensos o la encefalopatía espongiforme bovina. Todos estos casos supusieron un grave riesgo para la salud humana, para la salud animal, para la seguridad de la cadena alimentaria y en general para la confianza de los consumidores.

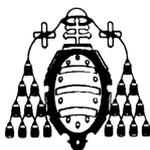
Por este motivo se hizo necesaria la regulación normativa de este tipo de materiales, aprobándose así una serie de Reglamentos de la Unión Europea y consecuentemente las disposiciones de aplicación de éstos en España.

La importancia de incluir esta normativa en el proyecto, es debido a que la materia prima (residuo fresco de pescadería y carnicería) utilizada en el proceso de digestión anaerobia, se clasifica como Sandach tipo III, de ahí la necesidad de describir qué significado tienen este tipo de residuos.

El Reglamento (CE) 1069/2009<sup>40</sup>, del 21 de octubre, por el que se establecen las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano y por el que se deroga el Reglamento (CE) 1774/2002, tiene por objetivo garantizar la protección de la salud pública, la sanidad animal y el medio ambiente y para ello se procedió a clasificar los diferentes Sandach según la peligrosidad y el destino final que podían tener. En base a ello, se diferencian tres tipos, las dos primeras categorías, Sandach tipo I y tipo II, hacen referencia a materiales que presentan un riesgo elevado e intermedio, respectivamente; es el caso de animales sospechosos de estar infectados por una encefalopatía espongiforme transmisible o animales usados en

---

<sup>40</sup> Reglamento (CE) 1069/2009, 21 de octubre (SANDACH) <https://www.boe.es/doue/2009/300/L00001-00033.pdf>



experimentos para la categoría I y, estiércol, guano no mineralizado o subproductos animales recogidos durante el tratamiento de aguas residuales para la categoría II.

En el caso que no ocupa, los residuos empleados en la digestión anaerobia pertenecientes a la categoría III, se enmarcarían dentro de lo que establece la legislación como subproductos animales generados en la elaboración de productos destinados al consumo humano o incluso productos de origen animal que ya no estén destinados al consumo humano por motivos comerciales, problemas de fabricación. Además el *Artículo 14* del Reglamento consultado, muestra las opciones de eliminación y uso de los materiales de esta categoría, haciendo referencia a la posibilidad de emplearlos en la fabricación de abonos y enmiendas del suelo de origen orgánico.

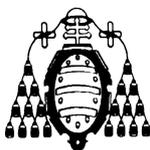
## **2.6.- ESPECIE DE CULTIVO: *LECHUGA BATAVIA***

Una vez expuestas las cuestiones teóricas asociadas a los fertilizantes objetos de estudio del presente documento, es necesario incluir un apartado relativo a la especie de cultivo sobre la que se van aplicar los productos fertilizantes correspondientes.

La especie de cultivo seleccionada para la investigación es la Lechuga Batavia, empleada ya en pruebas de fertilización con digestato bruto y con fertilizante comercial en una investigación previa y cuyos resultados se quieren comparar con los obtenidos en ésta.

La experimentación se ha desarrollado en el laboratorio del área de Tecnologías del Medio Ambiente ubicado en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. Durante el ciclo de cultivo, las plantas han permanecido en una estancia donde éstas pudieran tener acceso a suficiente horas de luz diarias y en la que la temperatura del ambiente permaneciera lo más constante posible. Es importante tener en cuenta que este lugar no es el entorno perfecto para el desarrollo de un cultivo, ya que las condiciones no son iguales a las de un invernadero o a las de una plantación al aire libre, no obstante, los resultados obtenidos en general, han sido muy satisfactorios.

Los principales factores externos que se han tenido en cuenta para seleccionar, en su momento, la especie vegetal comestible, son por un lado, las condiciones climatológicas



del lugar de trabajo, asociadas a la época del año en la que se desarrolló las investigaciones, de enero a junio y la duración del ciclo de cultivo, desde la siembra hasta la recolección de la cosecha, el cual debería ser entorno 2-3 meses.

### 2.6.1.- ORIGEN, TIPOS Y CARACTERÍSTICAS

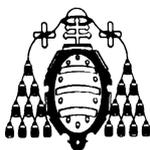
El origen de la lechuga no parece estar muy claro, algunos autores afirman que procede de la India, aunque hoy día los botánicos no se ponen de acuerdo por existir un antecesor de la lechuga, *Lactuca scariola* L., que se encuentra en estado silvestre en la mayor parte de las zonas templadas, siendo las variedades cultivadas actualmente una hibridación entre especies distintas. El cultivo de la lechuga se remonta a una antigüedad de 2.500 años, siendo conocida por griegos y romanos. Las primeras lechugas de las que se tiene referencia son las de hoja suelta, aunque las acogolladas eran conocidas en Europa en el siglo XVI<sup>41</sup>.

La lechuga es una planta anual perteneciente a la familia *Compositae*, género *Lactuca sativa* (*"Lactuca"* proviene del latín *lac* (leche), tal etimología se refiere al líquido lechoso principalmente savia que exudan los tallos de esta planta al ser cortados; mientras que *sativa* hace referencia a su carácter de especie cultivada). La lechuga Batavia empleada en la investigación presentada, de acuerdo a la forma del cogollo, es de tipo romana acogollada, semicrujiente, y presenta hojas de textura suave y aspecto aceitoso.



Figura 2.14 - Lechuga Batavia, Solara Amarilla.

<sup>41</sup> Referencia: Calidad y autenticidad de pimiento y lechuga cultivados bajo sistemas de producción sostenibles, Universidad de Murcia, 2014.



La siembra de este tipo de hortaliza se efectúa empleando semillas, como las que se muestran en la figura anterior. Es un cultivo que se adapta bien a las condiciones climatológicas existentes en el norte de España, ya que requiere temperaturas que oscilen entre los 15 y 20 °C para su correcto crecimiento. En cuanto a las exigencias del suelo, éste debe ser rico en materia orgánica, ligeramente alcalino y bien drenado.

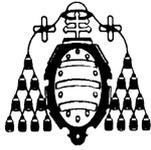
Como se ha comprobado en la investigación, la fase crítica del cultivo, es el inicio del crecimiento de las plantas, ya que si la luz solar incide de forma lateral, es decir, sobre el tallo, la planta consumirá la energía que aporta los nutrientes de la tierra y del abono en el desarrollo del mismo, en vez de ceñirse al crecimiento de las hojas.

Una vez superada la fase crítica, simplemente con luz solar y un riego frecuente, (la tierra debe permanecer siempre húmeda, aunque no encharcada) al cabo de dos o cuatro meses, desde la plantación, se puede efectuar la recolección, según el tamaño deseado del producto final.

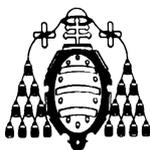
### 2.6.2.- VALORACION NUTRICIONAL

	Por 100 g de porción comestible
Energía (Kcal)	17
Proteínas (g)	1,5
Lípidos totales (g)	0,3
Hidratos de carbono (g)	1,4
Fibra (g)	1,5
Agua (g)	95,3
Calcio (mg)	40
Hierro (mg)	0,6
Magnesio (mg)	12
Sodio (mg)	9
Potasio (mg)	240
Fósforo (mg)	30
Vitamina A (µg)	29
Vitamina C (mg)	12
Vitamina B6 (mg)	0,07

Tabla 2.8 - Composición nutricional de la especie vegetal: Lechuga. (Fuente: Lechuga, Fundación Española de la Nutrición <http://www.fen.org.es/mercadoFen/pdfs/lechuga.pdf>)



Analizando los datos bibliográficos de la tabla anterior, se observa como la lechuga es un alimento que aporta muy pocas calorías por su alto contenido en agua y su escasa cantidad de hidratos de carbono, proteínas y grasas. En cuanto a su contenido en vitaminas, cabe mencionar la presencia, aunque con aportes poco significativos, de vitamina A y C que aportan al organismo una gran fuente de antioxidantes. El aporte de minerales tampoco resulta especialmente significativo, aunque sí posee pequeñas cantidades de fósforo, potasio, magnesio y calcio. Sin embargo, es preciso tener en cuenta que las hojas de color verde intenso, que por lo general suelen ser las menos tiernas, son precisamente las más ricas en vitaminas y minerales.



## 3. Metodología de trabajo

Este capítulo engloba todo el trabajo realizado para la elaboración, propiamente dicha, del proyecto que se está presentando. Incluye tanto los desarrollos matemáticos necesarios, tales como la determinación de las dosificaciones de los abonos empleados, como la descripción de los métodos analíticos que se han llevado a cabo a lo largo del proceso de investigación. Cabe indicar que en el Apéndice 8.2. del presente documento se muestra una planificación de las tareas desarrolladas, indicando la duración aproximada de las mismas.

### 3.1.- ENSAYOS DE FERTILIZACIÓN

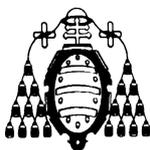
En este apartado se describirán los ensayos de fertilización llevados a cabo tanto para la estruvita, como para la mezcla (estruvita + fase sólida), así como la nomenclatura elegida para los mismos.

*NOTA: Para evitar repeticiones innecesarias, cuando se haga referencia a la mezcla, se entenderá que se trata del conjunto estruvita (E) + fase sólida (FS).*

Para el ciclo de cultivo de la Lechuga Batavia se han realizado un total de 10 ensayos, distribuidos de la siguiente forma:

- 1 ensayo correspondiente al testigo
- 3 ensayos correspondientes a la estruvita
- 6 ensayos correspondientes a la mezcla

El ensayo denominado testigo (T), hace referencia al empleo de la tierra sin adición de abono externo, permitirá comparar los resultados obtenidos con y sin adición de producto fertilizante. En el caso de la estruvita, los tres ensayos se corresponden con el estudio del efecto de tres dosis diferentes del fertilizante: dosis 1 (D1), dosis 2 (D2) y dosis 3 (D3), la primera hace referencia a la dosis óptima, obtenida a partir de la bibliografía consultada en base a la necesidad de N, mientras que las otras dos se obtienen al aplicar



una reducción del 20% (D2) y un aumento del 20% (D3) con respecto a la dosis óptima (D1).

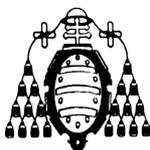
Para la mezcla, la metodología seguida ha sido diferente en comparación con la estruvita. Se ha probado el poder fertilizante de tres mezclas, ya mencionadas en el apartado 2.5.3.- *ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS DE LA ESTRUVITA Y FASE SÓLIDA*. Además, dado que la mezcla incluye fase sólida, fertilizante de origen orgánico, se ha probado el posible poder de liberación lenta, que presenta este tipo de fertilizantes. Para ello se ha estudiado el efecto de la aplicación de las tres mezclas a dos tiempos diferentes; entendiéndose este tiempo como el transcurrido entre el abonado de la tierra y la siembra de las semillas. El primer tiempo de trabajo será  $t_0$ , que indica que la siembra tiene lugar a continuación del abonado de la tierra con las diferentes mezclas, y  $t_1$ , que hace referencia a que, entre el abonado de la tierra y la siembra transcurren dos semanas.

De esta forma se contabilizan los diez ensayos realizados en el proyecto. La nomenclatura que se va a emplear en los apartados restantes de este documento es la que muestra a continuación:

<b>Estruvita</b>	<b>Mezcla</b>
T = Testigo	T = Testigo
D1 = Dosis 1 (Dosis óptima teórica)	M1 = Mezcla 1 (50% E + 50% FS) M1t0 / M1t1
D2 = Dosis 2 (reducción del 20% D1)	M2 = Mezcla 2 (40% E + 60% FS) M2t0 / M2t1
D3 = Dosis 3 (aumento del 20% D1)	M3 = Mezcla 3 (60% E + 40% FS) M3t0 / M3t1

Tabla 3.9 - Nomenclatura de los ensayos realizados.

*NOTA: En la investigación anterior, se ha probado el poder fertilizante de la dosis óptima de un abono comercial, mientras que para el digestato bruto se han aplicado tres dosis diferentes, correspondientes a la óptima, a una reducción y un aumento del 20% con respecto a la óptima, y con el fin de comprobar la capacidad de liberación lenta del*



*fertilizante de origen orgánico (digestato bruto), se han considerado tres tiempos de siembra para cada dosis estudiada,  $t_0$  y  $t_1$ , similares a los de la mezcla, y  $t_2$  se corresponde con el abonado de la tierra y la siembra a los treinta días del abonado.*

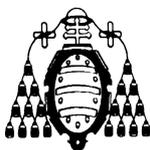
Cabe mencionar que para el desarrollo de cada uno de los diez ensayos mencionados con anterioridad, se han empleado semilleros de poliestireno reutilizable, de medidas: 35,7x22x6 cm (ancho x fondo x alto) los cuales constan de 24 alveolos, pequeños cuadrados donde se introducirán las semillas.

Otro aspecto a resaltar es que se ha decidido establecer un período de cultivo de dos meses, para el cultivo de la Lechuga Batavia, desde el inicio de la plantación hasta la recogida final de la cosecha, el motivo es incentivado por la necesidad de disponer de tiempo suficiente para desarrollar los análisis a posteriori que se indican en el resumen del presente documento.

### **3.2.- BALANCE DE NUTRIENTES**

La fertilización de los cultivos debe ser gestionada de manera adecuada en función del tipo de producto que se emplee en cada ocasión. Una premisa básica para un adecuado uso de los abonos es ajustar las dosis de los mismos, aplicadas a las necesidades de los cultivos en la cantidad, en el tiempo y en el espacio. Por ello, al realizar la fertilización es necesario prever qué cantidad de nutrientes de los aportados y en qué momento estarán disponibles, y en qué cantidad y cuando los necesitará el cultivo estudiado. Por eso es aconsejable la realización de planes de fertilización o de gestión de nutrientes antes de comenzar las labores de plantación.

Una correcta gestión de los nutrientes exige conocer las entradas y salidas de la explotación del suelo. Dicho balance de nutrientes se puede estimar en distintas escales espaciales (lote, establecimiento, región, país) y temporales (cultivo anual, secuencia de rotación, etc.). En general, los balances se estiman sobre la reserva total de nutrientes del suelo, bajo el concepto de "caja negra", es decir, sin considerar las transformaciones de los nutrientes y sus fracciones dentro del suelo. En sistemas agrícolas sin inclusión de animales, las principales salidas de nutrientes del suelo son debidas a la exportación a



consecuencia de las cosechas que se venden o se consumen en la propia finca (cosecha cultivada / cosecha de biomasa (forraje)), además de las pérdidas originadas por lavado o escorrentía. Entre las entradas o ganancias, se encuentran las debidas a la restitución de nutrientes en el suelo agrícola a través de restos de cosechas, fertilizantes, enmiendas, incorporación de biomasa, etc. También existen entradas de nutrientes de forma natural a través de las precipitaciones en forma de lluvia o el agua de riego<sup>42</sup>.

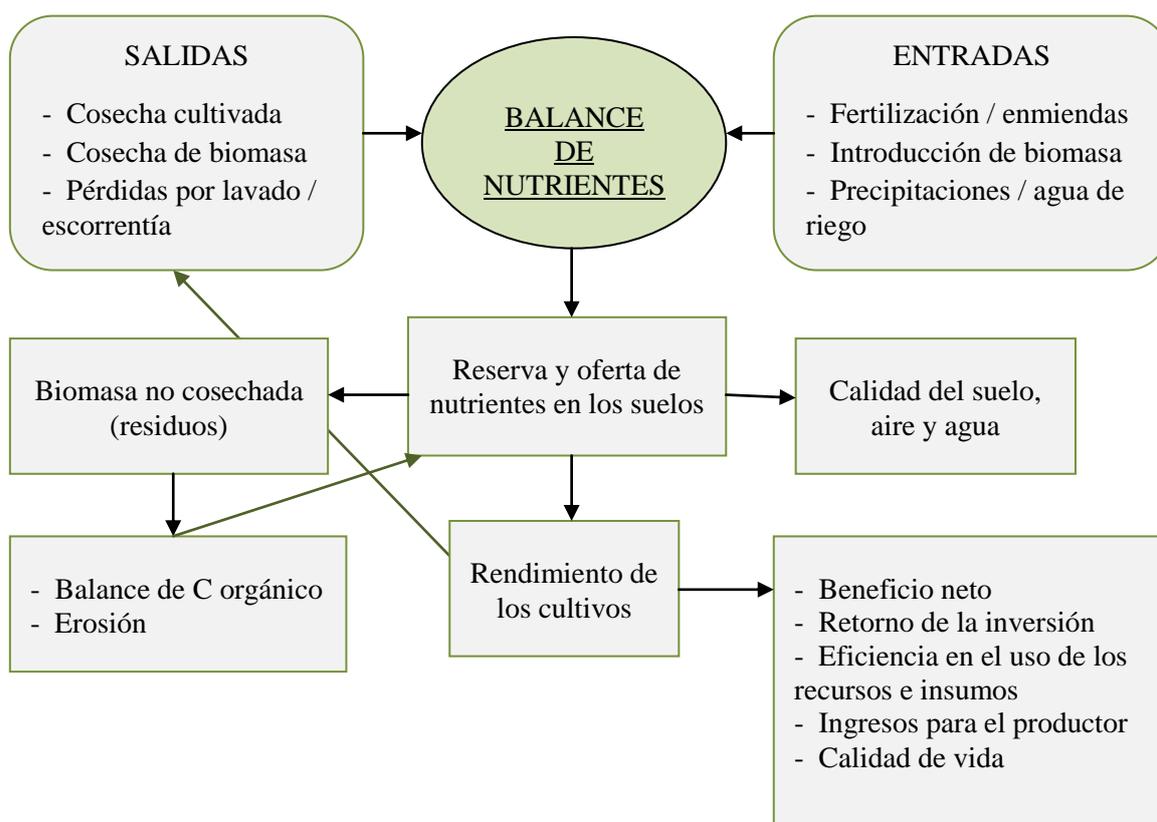
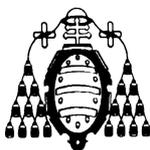


Figura 3.15 - Esquema de un balance de nutrientes en sistemas agrícolas.

Los balances además de indicar las reservas presentes en el suelo agrícola, muestran una idea de la oferta nutricional que se debe aplicar al mismo para lograr un sistema agrario equilibrado, teniendo en cuenta tanto los residuos en forma de biomasa no cosechada, como la calidad el suelo, aire y agua del ecosistema. El estudio de estos factores permite estimar el rendimiento de los cultivos, los cuales se relacionan con

<sup>42</sup> Referencia: *La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos?*, F. O. García / M. F. González Sanjuán, 2013.



diversos indicadores de sustentabilidad económica, ambiental y social. A su vez, la biomasa no cosechada impacta sobre los balances de carbono orgánico y sobre la protección del suelo frente a factores erosivos.

Balances fuertemente positivos de nutrientes pueden generar excesos de nutrientes en los suelos que conduzcan a la contaminación ambiental. Por otra parte, los balances negativos reducen la fertilidad del suelo, pudiendo afectar seriamente a la producción agrícola. Es necesario por tanto, tratar de lograr el equilibrio entre ambas situaciones.

### 3.2.1.- CRITERIOS DE DOSIFICACIÓN

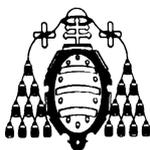
Una cuidada determinación de las dosis de fertilización a aplicar en un terreno en función de las necesidades del cultivo, contribuye a evitar situaciones de sobre-fertilización y por consiguiente el lavado de nitratos. Los elementos nutritivos disponibles deben ser aproximadamente igual a las necesidades del cultivo, considerando que la eficiencia no es nunca del 100% y evitando situaciones que pueden producir sobre-fertilización, tales como, la sobreestimación del rendimiento o la subestimación de las cantidades de elementos nutritivos aportados por los fertilizantes empleados<sup>43</sup>.

El cálculo de la dosis de aplicación puede realizarse siguiendo distintos criterios: balance de nutrientes, criterio del nitrógeno, del fósforo, del potasio, de la materia orgánica o de los metales pesados.

Cabe indicar que para determinar la dosificación óptima necesaria, tanto de los fertilizantes empleados en la investigación anterior, digestato bruto y fertilizante comercial, como de los estudiados en este proyecto, estruvita y fase sólida, se ha seleccionado el criterio del nitrógeno. El motivo de esta elección es debido a la importancia que tiene este elemento en el crecimiento y desarrollo de los cultivos, y además porque es necesario

---

<sup>43</sup> Referencia: M.P. Bernal, J, Antonio Alburquerque, M. Ángeles Bustamante, R. Clemente, *Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometamización PROBIOGAS*, 2011



ajustar su dosis en el medio agrícola, con la finalidad de evitar la contaminación medioambiental<sup>44</sup>.

Con el fin de ajustar el balance del nitrógeno en el sistema suelo - planta, es necesario considerar, por un lado el nitrógeno total disponible en los fertilizantes utilizados (nitrógeno inorgánico en su totalidad disponible, salvo la potencial volatilización como amoníaco y nitrógeno orgánico), así como las necesidades nitrogenadas del cultivo (existen tablas de referencia).

Según la bibliografía consultada las necesidades nutritivas para la especie de cultivo analizada en este proyecto, Lechuga Batavia, son las siguientes:

Lechuga	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
	Unidad: kg nutriente / ha		
Rango	120-140	30-50	180-230
Valor medio utilizado	130	40	205

Tabla 3.10 - Requerimientos nutricionales para la Lechuga Batavia. (Fuente: Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometanización, PROBIOGÁS 2011)

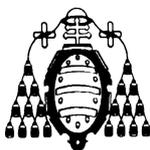
### 3.2.2.- CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN DE ESTRUVITA

A partir de las necesidades nutricionales de la Lechuga Batavia, concretamente del valor medio para el nitrógeno, y junto con la cantidad de nutrientes presentes en la estruvita, (datos de la tabla 2.3), se puede determinar la cantidad de abono que se requiere por semillero. El cálculo matemático es el que se muestra a continuación:

$$130 \frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \times \frac{\text{kg estruvita}}{57,2 \times 10^{-3} \text{ kg N}} \times \frac{1 \text{ ha}}{(100\text{m})^2} \times \frac{2,5 \times 10^{-3} \text{m}^2}{1 \text{ alv.}} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \times \frac{24 \text{ alv}}{1 \text{ sem}} \quad (3.3)$$

$$= 13,6 \text{ g estruvita / semillero}$$

<sup>44</sup> Real Decreto 261/1996, de 16 febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias. <https://www.boe.es/boe/dias/1996/03/11/pdfs/A09734-09737.pdf>



El valor obtenido se corresponde con la dosis óptima, es decir, ED1, además de trabajar con esta dosis, tal y como ya se ha explicado con anterioridad, se van a probar otras dos, obtenidas aplicando una reducción y un aumento del 20% con respecto a la dosis óptima. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

ED1	ED2	ED3
Unidad: g estruvita /semillero		
13,6	10,9	16,3

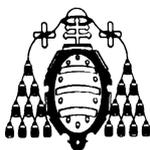
Tabla 3.11 - Dosificación de estruvita para cada dosis por semillero.

A partir de la dosis óptima (D1), se puede determinar los aportes reales de  $P_2O_5$  y de  $K_2O$  al emplear estruvita como abono, la comparación de estos valores con los datos bibliográficos recogidos en la tabla 3.10, permite comprobar si se están aportando o no los nutrientes necesarios al seleccionar el criterio del nitrógeno como referencia.

	Nutrientes		
	N	$P_2O_5$	$K_2O$
	Unidad: kg nutriente / ha		
Bibliografía	130	40	205
Estruvita	130	656,2	$7,7 \times 10^{-4}$

Tabla 3.12 - Aporte real de nutrientes para la dosis óptima de estruvita.

Los resultados indican que, la cantidad de fósforo se cubre al emplear la dosis óptima de estruvita, contrario a lo que ocurre con el potasio, el cual se aportaría en una cantidad muy por debajo de la establecida en la bibliografía. Estas conclusiones se ajustan a lo que cabría esperar, dado que la estruvita presenta en su composición, un elevado contenido en fósforo a la vez que una cantidad insignificante de potasio.



### 3.2.3.- CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS

De forma similar a como se ha procedido con la estruvita, se puede determinar la dosificación necesaria de las tres mezclas ensayadas a partir de la siguiente fórmula matemática, teniendo en cuenta el contenido nutricional, o más concretamente, el contenido en nitrógeno de las mismas, que para el caso de M1 es de  $29 \times 10^{-3}$  kg N /kg M1, para M2 es de  $23 \times 10^{-3}$  kg N /kg M2 y finalmente, para M3 es de  $34 \times 10^{-3}$  kg N /kg M3.<sup>45</sup>

$$130 \frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \times \frac{1 \text{ kg MEZCLA}}{\text{___ kg N}} \times \frac{1 \text{ ha}}{(100\text{m})^2} \times \frac{2,5 \times 10^{-3} \text{m}^2}{1 \text{ alveolo}} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \times \frac{24 \text{ alv}}{1 \text{ sem}} \quad (3.4)$$

Si se introducen los valores correspondientes para cada mezcla en la fórmula anterior, el resultado es el que se muestra en la siguiente tabla, donde además de indicar la cantidad total de mezcla que se debe añadir por semillero, se especifica la proporción de estruvita y fase sólida que se debe combinar.

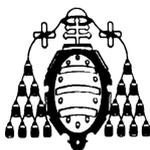
Ensayos	Mezcla	Estruvita	Fase sólida
	Unidad: g /semillero		
M1	26,8	13,4	13,4
M2	33,9	13,5	20,4
M3	22,9	13,7	9,2

Tabla 3.13 - Dosificación de las mezclas por semillero.

*NOTA: Cabe indicar que cada mezcla se probará a dos tiempos de siembra diferentes, por tanto, se emplearán dos semilleros, uno para la mezcla t0 y otro para la mezcla t1, de cada una de ellas, lo que supone que a la hora de preparar las mezclas se deberá añadir el doble de las cantidades mostradas en la tabla anterior.*

En función de estos datos, se pueden determinar los aportes reales de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O al emplear las tres mezclas como abonos (datos recogidos en la siguiente tabla). Comparando los resultados con los valores bibliográficos para la Lechuga Batavia, se observa que la

<sup>45</sup> Referencia: Tabla 2.6 del apartado 2.5.3.- ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS DE LA ESTRUVITA Y FASE SÓLIDA.



tendencia es similar al ensayo con estruvita, la cantidad de fósforo se cubre mientras que la de potasio se mantiene muy por debajo del dato consultado.

	Nutrientes		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
	Unidad: kg nutrientes / ha		
Bibliografía	130	40	205
M1	130	649,7	1,3
M2	130	656,1	2,0
M3	130	663,1	0,9

Tabla 3.14 - Aporte real de nutrientes para las tres mezclas ensayadas.

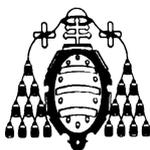
Cabe realizar una mención acerca de que el abono que aporta principalmente el nitrógeno y fósforo en las mezclas, es la estruvita, al presentar ésta un porcentaje elevado de dichos elementos, en comparación con el contenido de éstos en la fase sólida.

La cantidad de potasio presente en ambos fertilizantes (estruvita y fase sólida) es muy pequeña, y por este motivo, no se alcanza, en ninguno de los ensayos analizados, la exigencia nutricional en relación a este elemento para el cultivo de la Lechuga batavia.

*NOTA: En el Apéndice 8.3. del presente proyecto, se muestra como dato informativo, un resumen de las dosificaciones llevadas a cabo en la investigación anterior, tanto para el digestato bruto como para el fertilizante comercial, incluyendo además, para éste último, una breve explicación de sus características principales.*

### 3.3.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Una vez expuestos los cálculos matemáticos en relación a las dosificaciones de los abonos, es momento de pasar a describir detalladamente, por orden cronológico, el procedimiento experimental seguido para el correcto desarrollo de la investigación presentada.



### 3.3.1.- ACONDICIONAMIENTO DE LA TIERRA DE CULTIVO

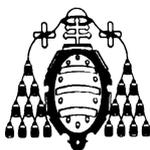
En primer lugar se ha procedido al acondicionamiento de la tierra empleada en la preparación de los semilleros. Cabe indicar, que con el fin de realizar los ensayos en las mismas condiciones en las que se desarrollaron en la investigación pasada, y poder así proceder a la comparación de los mismos, la tierra empleada en el proceso ha sido la misma en las dos situaciones y su procedencia es de un campo natural. Lo que se pretende utilizando tierra no comercial es poder evaluar con mayor facilidad y veracidad los efectos fertilizantes de los abonos empleados, dado que la mayoría de la tierra adquirida en un establecimiento ya incorpora pequeñas cantidades de abono.



Fotografía 3.5 - Aspecto de la tierra natural empleada en los ensayos.

Se contabiliza un total de 10 ensayos a desarrollar: T, ED1, ED2, ED3 y las mezclas M1, M2 y M3 probadas a dos tiempos diferentes,  $t_0$  y  $t_1$ , por lo que se necesitarán diez semilleros, lo que implica que la cantidad de tierra necesaria para completar los ensayos es de 18 kg.

Antes de comenzar la plantación de las semillas de la especie estudiada, es necesaria una adecuación previa de la tierra, reduciendo el tamaño de grano de la misma, a la vez que se elimina piedras o material inorgánico que se pueda apreciar a simple vista. Para facilitar esta labor se ha empleado un mortero de porcelana, utensilio que se emplea para moler o mezclar sustancias, convirtiéndolas así en un polvo fino.



Fotografía 3.6 - Mortero de porcelana.

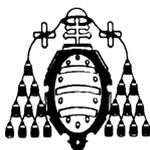
Una vez acondicionada toda la tierra necesaria en el proyecto, el siguiente paso consiste en la separación de la misma en diferentes envases, según los ensayos a desarrollar. Por un lado, la tierra necesaria para el testigo, el cual no requiere de la adicción de ningún tipo de fertilizante, por lo que ya estaría listo para iniciar la plantación. Seis recipientes diferentes, tres para la estruvita (D1, D2, D3) y otros tres para las mezclas (M1, M2, M3). Cabe indicar que en este último caso, dado que se probarán dos tiempos de siembra diferentes, la preparación debe realizarse conjuntamente, es decir, para cada mezcla se deberá combinar la tierra y el abono necesario para dos semilleros ( $t_0$  y  $t_1$ ).

A modo de resumen, y para facilitar la comprensión de la metodología empleada, se ha realizado la siguiente tabla que recoge las cantidades que se deben añadir en cada caso.

	ENSAYOS						
	T	ED1	ED2	ED3	M1 ( $t_0 / t_1$ )	M2 ( $t_0 / t_1$ )	M3 ( $t_0 / t_1$ )
Tierra (kg)	1,8	1,8	1,8	1,8	3,6	3,6	3,6
Estruvita (g)	-	13,6	10,9	16,3	26,8	27	27,4
Fase sólida (g)	-	-	-	-	26,7	40,8	18,4

Tabla 3.15 - Cantidades a aplicar para el cultivo de la Lechuga Batavia.

A la hora de realizar las mezclas de ambos abonos con la tierra, es imprescindible lograr una buena homogeneización entre los componentes, cabe destacar que dado que los dos fertilizantes empleados, estruvita y fase sólida, presentan un aspecto sólido, la mezcla con la tierra ha sido relativamente sencilla, en comparación con el ensayo del digestato, (probado en la investigación anterior) ya que al tratarse de un material líquido, la mezcla con la tierra formó un producto pastoso muy difícil de manipular, que dificultó las labores



de siembra de las semillas. Este motivo, refuerza la necesidad del tratamiento del digestato, a fin de obtener otros productos derivados del mismo, cuya manipulación sea viable desde el punto de vista técnico.

### 3.3.2.- PREPARACION Y SEGUIMIENTO DEL CULTIVO

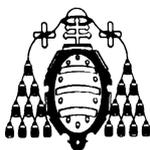
En este apartado se indicará como se ha procedido en la preparación de los semilleros y cuál es el seguimiento que se ha realizado a los ensayos una vez iniciado el período de cultivo.

Las mezclas preparadas se deben humedecer, dado la sequedad que presenta la tierra utilizada. La preparación de los semilleros es similar para todos los ensayos estudiados, el proceso comienza cubriendo con la tierra, en el caso del testigo, y con la tierra abonada, para la estruvita y las mezclas, alrededor del 75% del contenido de los alveolos, añadiendo a continuación las semillas de la Lechuga Batavia, concretamente se ha seleccionado la cantidad de tres semillas por alveolo. Finalmente se cubre hasta la superficie del semillero, con las mezclas correspondientes en cada caso, sin compactar en exceso la tierra para evitar el deterioro de las semillas. Se deberá identificar el ensayo correspondiente junto con la dosis de aplicación y el día de la siembra mediante etiquetas plastificadas.

Los semilleros se colocarán sobre bandejas a fin de facilitar la labor de riego, permitiendo mantener la parte inferior de los alveolos siempre húmeda, y se ubicarán en las repisas de las ventanas del Laboratorio donde se ha desarrollado la investigación, con el objetivo de lograr una correcta incidencia de la luz solar.

*NOTA: La intención ha sido comenzar con el cultivo a mediados de enero, a fin de disponer de tiempo suficiente para realizar todas las pruebas previstas en la investigación, sin embargo la climatología acaecida en ese período dificultó las labores de cultivo, de manera que se tuvieron que repetir los ensayos a principios de febrero.*

El seguimiento de los ensayos ha consistido en la realización de fotografías durante los dos meses que ha durado el cultivo de la Lechuga Batavia, el objetivo es la comprobación visual del progreso de la especie vegetal, permitiendo realizar una primera



comparación del poder fertilizante de los abonos ensayados al observar el resultado final alcanzado.

### 3.4.- MÉTODOS ANALÍTICOS

En este apartado se pretende recopilar toda la información necesaria para desarrollar los métodos analíticos aplicados a la especie de cultivo ensayada. Transcurridos dos meses desde el inicio de la plantación, tiempo establecido para el cultivo de la Lechuga Batavia, se ha procedido a la recolección de las plantas con el fin de determinar los siguientes aspectos:

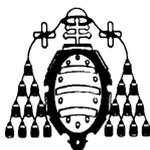
- Masa de las plantas cosechadas.
- Eficiencia agronómica.
- Estudio estadístico.
- Determinación de especies químicas inorgánicas (metales).
- Determinación de nutrientes (N y P).

A continuación se detallará la metodología seguida para el desarrollo de cada uno de los aspectos indicados con anterioridad. Los resultados logrados en la investigación se indicarán en el siguiente capítulo (*4.RESULTADOS EXPERIMENTALES*).

#### 3.4.1.- MASA DE LAS PLANTAS COSECHADAS

Finalizado el período de cultivo se procede a extraer y contabilizar las plantas logradas en cada ensayo. Cabe mencionar que el aspecto final de los cultivos, el cual se mostrará en el siguiente capítulo, no es el aspecto común de una lechuga, ya que el período de plantación no ha sido suficiente para obtener los cogollos típicos de esta especie, a pesar de esto, dado que en la investigación anterior se ha procedido de la misma forma, los resultados alcanzados permiten la comparación entre los diferentes ensayos.

La extracción de los cultivos se efectúa cortando la planta a ras de la superficie de la tierra (sin incluir la raíz, ya que no es parte comestible de la planta). El contenido de cada alveolo se introducirá en un crisol, previamente pesado e identificado (fotografía 3.7),



pesando el conjunto en una balanza de precisión de la marca comercial *Mettler Toledo* Modelo *AT261 DeltaRange*.



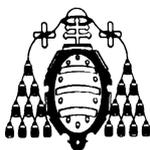
Fotografía 3.7 - Crisol con el contenido de un alveolo.

El modelo empleado presenta un campo de pesada de 205 g con una precisión de indicación de 0,01 mg, además cuenta con puertas protectoras motorizadas que permiten aislar la muestra a medir.



Fotografía 3.8. - Balanza analítica, marca *Mettler Toledo*, modelo *AT261 DeltaRange*.

Por otro lado, para determinar la masa cosechada seca, será necesario introducir los crisoles con las plantas húmedas en una estufa, durante un tiempo mínimo de dos horas a la temperatura de 105 °C. Estas condiciones de operación permiten asegurar la eliminación de toda la humedad presente en los cultivos. El equipo empleado es de la casa comercial *JP Selecta*, modelo "*Digitronic*", mostrado en la siguiente fotografía:



Fotografía 3.9 - Estufa de precisión universal "Digitronic", marca JP Selecta.

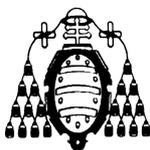
Transcurrido el tiempo estipulado de los crisoles en la estufa, éstos se extraen y se introducen en un desecador, empleado para proteger las muestras de la humedad, al mismo tiempo que adquieren temperatura ambiente; transcurridos aproximadamente treinta minutos, se puede proceder al pesaje de los crisoles junto con las plantas secas, a fin de obtener la masa seca cosechada.

Una vez recopiladas todas las masas, húmedas y secas, de las plantas obtenidas, éstas se almacenan en sobres individuales (uno para cada contenido de un alveolo) elaborados con papel de aluminio, identificando el ensayo correspondiente.



Fotografía 3.10 - Almacenamiento de las plantas cosechadas.

Estas plantas almacenadas serán empleadas en la determinación del contenido en metales que presentan los cultivos cosechados. Cabe indicar que, finalizado el período de cultivo, se ha extraído la mejor planta de cada ensayo para continuar con su desarrollo un



mes más, y posteriormente se les ha aplicado el procedimiento para la determinación del contenido nutricional de las mismas.

### **3.4.2.- EFICIENCIA AGRONÓMICA**

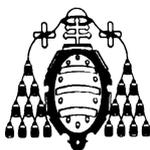
La eficiencia agronómica calculada en la investigación, expresa el rendimiento, en términos de biomasa húmeda de los tratamientos evaluados con respecto a la fertilización química tradicional, es decir, con respecto al fertilizante químico comercial adquirido en un establecimiento, y cuyo poder fertilizante ha sido probado en la investigación anterior.

Cabe indicar que al ser la eficiencia agronómica una medida de mejora del rendimiento de los ensayos evaluados con respecto al fertilizante comercial, si en algún caso se obtiene un porcentaje negativo éste no se tendrá en cuenta a efectos del proyecto presentado, al no conseguir superar los resultados obtenidos con el ensayo tomado de referencia (fertilizante químico comercial).

El cálculo permite determinar cuantitativamente qué ensayos han resultado ser más satisfactorios para cada fertilizante probado. No obstante, estos resultados se cotejarán con los logrados a través del tratamiento estadístico, IBM SPSS, cuyo procedimiento de describirá a continuación.

### **3.4.3.- ESTUDIO ESTADÍSTICO**

La Estadística permite el estudio de métodos científicos para recoger, organizar, resumir y analizar datos, así como para sacar conclusiones válidas y tomar decisiones razonables basadas en dicho análisis. Para ello es necesario realizar un muestreo, es decir, seleccionar una muestra representativa de la población, en el caso que nos ocupa las poblaciones objeto de estudio son los diferentes ensayos de fertilización realizados, mientras que la muestra, hace referencia a la masa cosechada. A pesar de que en los estudios estadísticos el volumen de datos con los que se trabaja es elevado, en este proyecto solo se disponen, como máximo (si se ha obtenido planta de todos los alveolos)



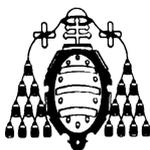
de 24 muestras por población analizada. No obstante se ha querido incorporar este estudio básico, como una herramienta más en la valoración de los resultados logrados.

El objetivo final es inferir estadísticamente algo sobre la población, es decir, obtener una conclusión sobre alguna característica relevante de las poblaciones sobre las que se está aplicando el estudio. En este caso concreto, el objetivo es doble, por un lado determinar cuál sería la mejor dosis de aplicación para el ensayo de la estruvita, y por otro lado, qué mezcla ha resultado ser la mejor opción, especificando el tiempo de siembra correspondiente.

La herramienta empleada para desarrollar este estudio ha sido el programa estadístico IBM SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*), empleado a menudo en las ciencias sociales y, de un modo más específico por las empresas y profesionales de la investigación. Cabe mencionar que este estudio se aplica sobre las plantas en su estado natural comestible, es decir, los datos empleados para el desarrollo estadístico son las masas húmedas de los cultivos cosechados, recogidas en el Apéndice 8.5. Además, cabe indicar que en los ensayos probados no se han obtenido datos de los 24 alveolos, ya que en algún caso no se ha recogido planta y por tanto no se tendrán en cuenta a efectos de cálculos posteriores.

En primer lugar se ha llevado a cabo la determinación de ciertos estadísticos descriptivos, tales como, número de datos válidos, media aritmética y mediana (medidas de tendencia central, que pretenden resumir en un solo valor a un conjunto de valores, representando un centro en torno al cual se encuentra ubicado el conjunto de los datos) además de la desviación típica (medida de dispersión que indica si los valores de las muestras está muy concentrados o poco concentrados en torno a las posiciones centrales) para cada caso estudiado.

A continuación se han realizado varios contrastes de hipótesis a fin de lograr el acometido de este estudio. Un contraste de hipótesis es un procedimiento que sirve para juzgar si una propiedad que se supone en una población estadística es compatible con lo observado en una muestra de dicha población. Para el planteamiento de estos contrastes se deben definir varios parámetros: la hipótesis nula ( $H_0$ ), es la hipótesis que se desea contrastar, la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), y el nivel de significación, concepto asociado a la

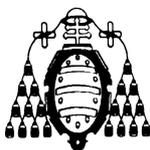


verificación de una hipótesis y que para el estudio presentado será de  $\alpha = 0,05$ . La decisión de seleccionar  $H_0$  o  $H_1$  se toma utilizando el valor p (o p-valor) proporcionado por el contraste, de forma que, si el p-valor obtenido es mayor que el nivel de significación, no se rechaza la hipótesis nula, en caso contrario, si el p-valor obtenido es inferior al nivel de significación, esto quiere decir que se rechaza la hipótesis nula, aceptando por tanto la hipótesis alternativa.

Los contrastes de hipótesis, por orden cronológico, que se han realizado en este proyecto son:

- Estudio de la normalidad: Dado que el tamaño de las muestras analizadas no supera los 50 datos, se puede emplear la prueba de Shapiro-Wilk como método de contraste de normalidad. La hipótesis nula hace referencia a que los datos proceden de una población normal, mientras que para la hipótesis alternativa los datos NO proceden de una población normal. Este estudio es muy importante sobre todo en muestras pequeñas, ( $n < 30$ , como es el caso que nos ocupa), ya que muchos de los test estadísticos, para su correcta aplicación e interpretación, asumen normalidad en los datos.
- Prueba T para muestras independientes: Esta prueba permite comparar las medias de la variable cualitativa ensayo, (formada por los 10 grupos correspondientes a T, ED1, ED2, ED3, M1, M2 y M3, estas tres últimas probados a t0 y t1) de dos en dos. El programa SPSS aporta información en un único cuadro resumen, en el que muestra, en primer lugar, una prueba de homogeneidad de varianzas (test de Levene), en la que el contraste realizado ha sido:  $H_0 = \sigma_1^2$  (varianza en la muestra 1) =  $\sigma_2^2$  (varianza en la muestra 2)  $H_1 = \sigma_1^2$  (varianza en la muestra 1)  $\neq \sigma_2^2$  (varianza en la muestra 2); y por otro lado, establece el contraste para la igualdad de medias en los dos grupos analizados, en función de si se asumen varianzas iguales o no, y donde la hipótesis nula es la igualdad de las medias comparadas, mientras que la hipótesis alternativa será lo contrario.

Los resultados logrados con este tratamiento de datos se mostrarán en el siguiente capítulo, y permitirán comprobar si los mejores ensayos, determinados estadísticamente,



concuerdan con los mejores ensayos obtenidos a partir del cálculo de la eficiencia agronómica.

#### 3.4.4.- DETERMINACIÓN DE ESPECIES QUÍMICAS INORGÁNICAS (METALES)

En este apartado se pretende describir como se han realizado las determinaciones cuantitativas del contenido de ciertos metales (Cadmio Cd, Cobre Cu, Cromo Cr, Níquel Ni, Plomo Pb y Zinc Zn) existentes en las plantas cultivadas. Concretamente este estudio se ha aplicado sobre el testigo y sobre el mejor ensayo obtenido para la estruvita, así como para la mejor mezcla probada. Además, se ha desarrollado un procedimiento que permitió la determinación de estos mismos metales, en la tierra de cultivo empleada en la investigación (con y sin abono).

Los metales analizados en este proyecto, han sido seleccionados ya que son los que aparecen recogidos en la normativa sobre fertilizantes, ya mencionada en el capítulo anterior; éstos se pueden clasificar en dos grupos<sup>46</sup>, los oligoelementos (Cr, Cu, Ni y Zn) necesarios en pequeñas cantidades para el correcto desarrollo de los organismos, pero que su presencia en exceso pueden resultar tóxicos, y los metales sin función biológica conocida, altamente tóxicos que incluyen el Cd y el Pb, entre otros. La peligrosidad de estos elementos va a depender de la concentración, de la forma química, así como de la persistencia de los mismos en el organismo.

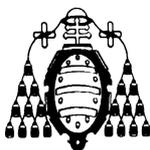
El estudio de la presencia de estos metales en el medio ambiente tiene como fin último la protección de la salud humana, y por ello es esencial tener presentes cuatro factores en la cadena suelo-planta-hombre, éstos son<sup>47</sup>:

- Acumulación de metales en el suelo, esto puede ser debido a varios factores, entre los que cabe destacar: La deposición de contaminantes atmosféricos emanados por las industrias a través de las aguas de lluvia o por el viento; contaminación procedente de las minerías o del derrame de crudos; y en

---

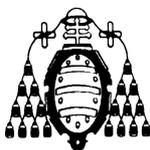
<sup>46</sup> Referencia: *Efecto del Cromo en las plantas*, S. A. Guarín Torres, 2012.

<sup>47</sup> Referencia: *Informe Criterios de calidad de suelo agrícola*, Ministerio de Agricultura SAG, 2005.



relación al tema tratado en esta investigación, se encuentra el riego continuo de los cultivos con aguas altamente contaminadas con desechos industriales, uso masivo y continuo de fertilizantes, enmiendas e insumos de síntesis química, así como el empleo de residuos sanitarios o estiércoles sin la previa descomposición o degradación de los mismos.

- Biodisponibilidad del elemento en el suelo: Para que se produzca extracción de los metales por la planta, éstos deben estar biodisponibles. Esta característica depende de la solubilidad y movilidad de los metales en suelo. En el suelo los metales se asocian con distintas fracciones: en solución, como iones de metal libre y complejos metálicos solubles, adsorbida en los sitios de intercambio de los constituyentes inorgánicos del suelo, ligada a la materia orgánica, residual en la estructura de los minerales silicatados, etc. Aunque sólo los metales asociados con las dos primeras fracciones están realmente disponibles para que las plantas los extraigan.
- Fitotoxicidad, este término se asocia normalmente con la acumulación de una sustancia dañina en el tejido de una planta en niveles que afectan a su crecimiento y normal desarrollo, sin embargo esta definición no es completamente correcta ya que el crecimiento de los cultivos no sólo se ve afectado por la acumulación de sustancias tóxicas, sino que también por factores medioambientales como deficiencias nutricionales, estrés hídrico, daño en raíces u otros; es necesario por tanto que para confirmar que existe fitotoxicidad por metales, éstos tienen que estar acumulados en el tejido vegetal causando un daño en las plantas, no acusable a otro tipo de desórdenes del crecimiento.
- Riesgo en la cadena alimentaria (bioacumulación): Los cultivos se pueden clasificar según el riesgo alimentario en relación a cada metal como inocuos, susceptibles y peligrosos, dependiendo en primer lugar si se encuentran cultivados en suelos con alta biodisponibilidad del elemento y si son ingeridos directa o indirectamente por el ser humano. El contenido máximo permitido de Cd y Pb en algunos alimentos, concretamente en la lechuga, quedan definidos por la Unión Europea a fin de asegurar la protección de la



salud humana frente a estos elementos. (Los valores estipulados en la normativa se mostrarán en el siguiente capítulo, concretamente en el apartado 4.5.- *Especies químicas inorgánicas (metales)*).

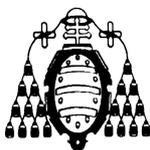
En el caso que nos ocupa, interesa el efecto de la fertilización en el contenido de metales en los cultivos, es decir, si la aplicación de los fertilizantes, supone un aumento de estos elementos en las plantas, en comparación con el contenido presente en el cultivo sin fertilizar (testigo). Dado que se dispone de datos sobre los metales presentes en las plantas fertilizadas con la mejor dosis del digestato bruto (investigación anterior), también es interesante comparar el contenido presente en este ensayo, con los resultados alcanzados en el presente proyecto para los ensayos de estruvita y mezcla estudiados.

El procedimiento seguido para la determinación de los metales, ya mencionados, en las plantas recolectadas, así como en la tierra de cultivo (con y sin abono), se detallará a continuación.

#### **3.4.4.1.- Pre-tratamiento de las muestras (Digestión por microondas) para el análisis del contenido en metales**

A partir de la eficiencia agronómica y del tratamiento estadístico, se han obtenido los ensayos que mejor resultado presentan para cada fertilizante analizado. La biomasa recogida de cada uno de ellos, deberá someterse a un proceso de digestión por microondas. Esta técnica permite la mineralización de muestras sólidas a fin de generar una disolución que contenga los metales presentes en las mismas, eliminando para ello la materia orgánica que contienen. Es un procedimiento estándar en la preparación de muestras para el análisis de elementos a través de técnicas espectroscópicas.

El equipo empleado es un digestor de la marca *Milestone*, modelo *ETHOS 1 Advanced microwave digestion system*, (fotografía 3.12).

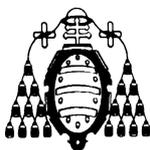
Fotografía 3.11 - Digestor por microondas *ETHOS 1*.

El proceso comienza introduciendo las muestras de cada alveolo en los recipientes específicos del equipo de digestión, concretamente se dispone de 10 vasos a presión para el desarrollo del experimento.

Fotografía 3.12 - Vasos de teflón, *ETHOS 1*.

Cabe indicar que el protocolo seguido no permite introducir más de 0,5 g de materia orgánica en cada vaso, esto no presenta un problema para las muestras de plantas analizadas, ya que el peso seco de las mismas no supera esta cantidad y por lo tanto, no lo hará, el contenido en materia orgánica presente en las mismas. En el caso del análisis de suelo (tierra) será necesario limitar el contenido del mismo a la especificación del protocolo.

La adición de ciertos reactivos en las muestras permite completar el proceso, en el caso de las plantas, se ha empleado peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y ácido nítrico ( $HNO_3$ ). A continuación, se cierran los recipientes herméticamente en unos soportes y se introducen en el equipo.



La temperatura que alcanzan las muestras se mide con un sensor colocado directamente en el vaso de control y además el equipo dispone de un sensor infrarrojo de alta sensibilidad sin contacto, que mide y controla la temperatura en todos los vasos de forma efectiva, para una mayor seguridad y control del proceso.



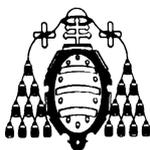
Fotografía 3.13 - Sonda de temperatura colocada en el vaso de control.

El proceso se maneja a través de un terminal de control que dispone de una pantalla táctil iluminada, en color y fácil de leer, que muestra la evolución de la temperatura en función del tiempo. El tiempo establecido es de hora y media y la temperatura máxima alcanzada en el equipo es de 200°C.

Una vez finalizado el proceso se vierte el contenido de los vasos en matraces aforados, y se diluye con agua destilada (en este caso hasta un volumen de 20 mL). Las disoluciones acuosas obtenidas, se almacenan en unos recipientes de plástico, previamente identificados, listas para el análisis del contenido en metales de las mimas.

En el proceso de digestión del suelo, tierra empleada en los cultivos, se han considerado cinco réplicas para una mayor representación de la muestra total. El procedimiento seguido en un primer momento, ha sido idéntico al definido anteriormente para las plantas. Sin embargo, el resultado de la digestión no ha sido satisfactorio al no verse completada la misma (las disoluciones obtenidas presentaban partículas de tierra sin digerir infiriendo un color marrón a las muestras), esto puede ser debido a que los reactivos empleados no permiten disolver los silicatos presentes en la tierra.

Tras varias pruebas fallidas, se logró completar la digestión de las muestras de suelo empleando una combinación adecuada de ácido nítrico y ácido fluorhídrico (HF). El



problema que se presenta al utilizar esta mezcla de reactivos deriva del empleo del ácido fluorhídrico, ya que es necesario eliminar, tras el proceso de digestión, el exceso de fluorhídrico que puedan presentar las disoluciones obtenidas, ya que en caso contrario y dado que es altamente corrosivo, podría deteriorar irreversiblemente equipos que sean utilizados posteriormente y que dispongan de elementos de vidrio.

Por este último motivo las cinco réplicas de suelo digeridas, almacenadas en bombas de teflón, se deben colocar sobre una placa calefactora, a una temperatura de 150°C, durante un tiempo aproximado de dos horas. Este proceso se ha llevado a cabo dentro de una vitrina de gases para evitar la inhalación de los compuestos volatilizados.

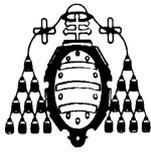


Fotografía 3.14 - A la izquierda: Placa calefactora marca *Stuart* modelo SD 500, a la derecha: Vitrina de gases marca *Romero* modelo *FLOWtronic*.

El resultado de este proceso es un sólido al que se le suele denominar perla orgánica, la cual se re-disuelve con una pequeña cantidad de ácido nítrico, enrasando finalmente con agua destilada en un matraz aforado, en este caso de 25 mL.

Una vez obtenidas las muestras en disolución, tanto de las plantas como de la tierra, siguiendo los procedimientos correspondientes en cada caso, se procederá a la determinación del contenido en metales, proceso que se explicará a continuación.

*NOTA: En el Apéndice 8.4. del presente documento, se muestran los datos más relevantes de las Fichas Internacionales de Seguridad Química (FISQ), de los reactivos empleados en este Trabajo Fin de Máster. Para más información consultar la [página web](#) del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo:*



<http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.a82abc159115c8090128ca10060961ca/?vnextoid=4458908b51593110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD>

### 3.4.4.2.- Espectrometría de Absorción Atómica (EAA)

La medición de los seis metales, ya mencionados, se ha realizado utilizando la técnica de espectrometría de absorción atómica, método que se aplica a átomos aislados, permitiendo la determinación cuantitativa, cualitativa y unielemental de más de sesenta metales diferentes en una única solución. En general se trata de equipos rápidos, selectivos y sensibles.

El siguiente esquema refleja cual es la forma de operar de este tipo de técnica aplicada a la determinación de metales solubilizados:

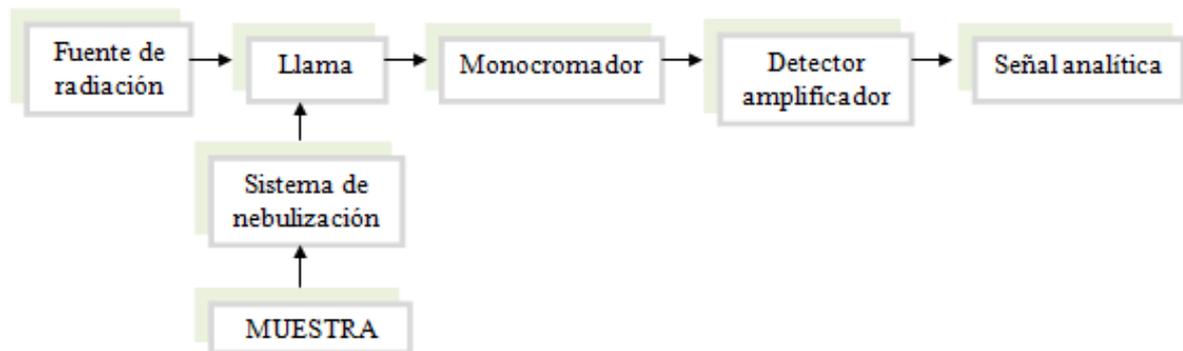


Figura 3.16 - Esquema del proceso de Espectrometría de Absorción Atómica.

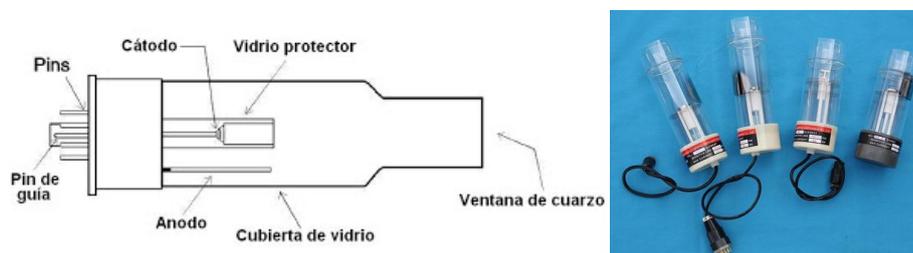
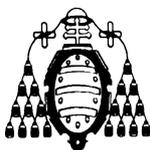


Figura 3.17 - Lámpara de cátodo hueco.

La fuente de radiación empleada en la investigación, es una lámpara de cátodo hueco, que consiste en un cilindro de vidrio. En uno de sus extremos se disponen dos alambres de wolframio, uno de ellos actúa como ánodo, y el otro como cátodo. Este último se uno por



su extremo a un cilindro hueco de metal, recubierto por el metal que se desea determinar. La lámpara está rellena de helio o argón. Cuando se hace pasar corriente el gas se ioniza, y sus partículas bombardean el cátodo, excitando a los átomos metálicos, cuando estos vuelven a su estado fundamental lo hacen emitiendo radiación en una longitud de onda característica del metal en cuestión.

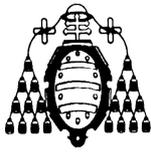
Una vez conectada la lámpara correspondiente del metal a analizar, será necesario realizar un calibrado previo a fin de corroborar el correcto funcionamiento del equipo. Para ello se evalúa en primer lugar el blanco, agua destilada, seguido de diferentes patrones preparados con anterioridad, completando así la recta de calibrado.

La muestra líquida introducida en el equipo, es aspirada a través de un tubo capilar y conducida a un sistema de nebulización donde ésta se desintegra y se convierte en un aerosol (gotas finas). Las gotas formadas son conducidas a través de un sistema de atomización, en este caso concreto se trata de una llama formada por una mezcla de combustible y oxidante. Esta llama aporta la energía necesaria para la vaporización de la muestra, es decir, la formación de átomos. La intensidad de radiación se verá atenuada como consecuencia de la absorción de la radiación por parte de los átomos generados, radiación absorbida que por otro lado, está ligada a la concentración de esos átomos en la muestra problema. La señal de la lámpara una vez que pasa por la llama llega a un monocromador, cuya misión es discriminar todas las señales que acompañan a la línea de interés. Esta señal de radiación electromagnética llega a un detector que compara la señal con la enviada por la fuente, permitiendo así la cuantificación del elemento utilizado.

Las longitudes de onda correspondientes a cada uno de los metales medidos, así como el tipo de llama que se produce en cada caso, se muestra en la siguiente tabla:

Elemento	Tipo de llama	Longitud de onda (nm)
Cd	Aire - acetileno (oxidante)	228,8
Cr	Aire - acetileno (muy reductora)	357,9
Cu	Aire - acetileno (oxidante)	324,7
Ni	Aire - acetileno (oxidante)	232
Pb	Aire - acetileno (oxidante)	283.3
Zn	Aire - acetileno (oxidante)	213.9

Tabla 3.16 - Características instrumentales de la EAA.



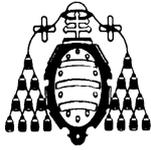
El equipo de EAA utilizado es de la casa comercial *Perkin Elmer*, modelo *PinAAcle Serie 900F*, mostrado en la fotografía siguiente:



Fotografía 3.15 - Espectrómetro de absorción atómica, marca *Perkin Elmer*, modelo *PinAAcle Serie 900F*.

Consideraciones en el proceso de medida:

- Como parámetro de control, cada diez muestras analizadas se medirá un blanco, y cada veinte el patrón de menor concentración, a fin de asegurarse de que el equipo está realizando su función correctamente.
- El capilar por el que el equipo aspira la muestra siempre debe estar sumergido en agua destilada para evitar el deterioro del mismo. En caso de atascamiento, esta sonda posee una válvula que se puede regular para que expulse aire en contracorriente, desatascando así el conducto.
- Este equipo permite medir la concentración en unidades de partes por millón (ppm), es decir, indica el contenido del metal en mg metal / L muestra.



### 3.4.5.- DETERMINACIÓN DE NUTRIENTES (N y P)

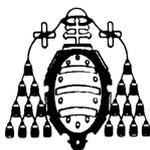
El análisis de las plantas se suele emplear como una herramienta de diagnóstico. En un sentido amplio, este estudio involucra el análisis de compuestos orgánicos (proteínas, azúcares, aminoácido, etc.) que forman parte de la calidad de un cultivo, mientras que en un sentido más acotado, el análisis nutricional de las plantas, consiste en la determinación de la concentración de un elemento o fracción del mismo en una muestra proveniente de una parte definida del cultivo, muestreado en una determinada etapa de su desarrollo fisiológico. Es importante contemplar que la concentración de un nutriente dado en la planta es un valor que integra todos los factores que han afectado al crecimiento de la misma, siendo los principales: el suelo, las condiciones climáticas, el riego, la fertilización así como la disponibilidad de ese nutriente en el suelo agrícola.

Los resultados logrados a través del análisis nutricional tanto de los cultivos, como del suelo representativo del área donde se van a desarrollar los mismos, permiten obtener información acerca de<sup>48</sup>:

- Recomendaciones de fertilización en unidades de producción: Se trata de evaluar el estado nutricional del cultivo que permita elaborar adecuados planes de fertilización para un óptimo rendimiento agrario.
- Confirmación de las causas de un problema: Verificar si el estado nutricional de las plantas es el adecuado, o identificar la existencia de problemas nutricionales. Éstos pueden ser detectados en primera instancia por sintomatología y luego confirmados mediante el estudio nutricional de la planta.
- Relevamientos nutricionales: El conocimiento conjunto del estado nutricional tanto de los cultivos como del suelo empleado para el crecimiento de los mismos, proporciona información acerca de posibles deficiencias de un nutriente específico y puede ayudar a delimitar el área en la cual la deficiencia posiblemente exista.

---

<sup>48</sup> Referencia: *Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencia de nutrientes*, M. Barbazán 1998.



- Protección del medio ambiente: El exceso de nitratos y fosfatos en el suelo agrícola puede provocar la infiltración de los mismos en las aguas subterráneas o ser arrastrados a cursos de agua, generando una sobrecarga de nutrientes lo que desemboca en una explosión de algas que suprimen otros seres vivos acuáticos (eutrofización).

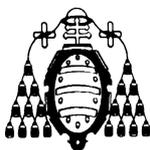
Además de los objetivos mencionados con anterioridad, por los cuales se puede realizar un análisis nutricional de los cultivos y de los suelos, éste también se puede desarrollar a fin de realizar un balance entre el suministro de nutrientes y la extracción total que realiza un cultivo en una fase determinada de su crecimiento. Esta cuestión, ha sido la motivación y el objetivo inicial por el que se ha decidido incluir este apartado dentro de la investigación presentada.

El balance, aplicado sobre el mejor ensayo obtenido para la estruvita y para las mezclas, consistiría en la igualdad del contenido nutricional a tiempo 0, es decir al inicio de la plantación, (nutrientes en la tierra + nutrientes aportados por las dosis de fertilizantes correspondientes) y del contenido nutricional a tiempo final, es decir, una vez transcurridos los dos meses establecidos para el crecimiento de la Lechuga Batavia (nutrientes en las plantas + nutrientes en la tierra una vez extraídos los cultivos + posibles pérdidas que se pueden producir por lixiviación o incluso volatilización de los compuestos).

Para llevar a cabo esta determinación se requiere un pre-tratamiento de las muestras, mediante la oxidación de los compuestos de nitrógeno y fósforo, a fin de obtener nitratos y fosfatos, sales que posteriormente se cuantificarán a través de una técnica de cromatografía.

#### **3.4.5.1.- Pre-tratamiento de las muestras (Digestión por microondas) para el análisis de nutrientes**

El proceso de digestión por microondas, permite la preparación de muestras para el análisis de las mismas tanto a través de técnicas espectroscópicas, tal y como se ha descrito en el apartado anterior sobre la determinación de metales, como mediante técnicas cromatográficas.



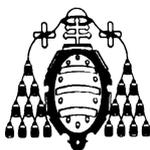
Dado que el proceso de acondicionamiento de las muestras de plantas, es idéntico al desarrollado en el sub-apartado 3.4.4.1.- *Pretratamiento de las muestras (Digestión por microondas) para el análisis del contenido en metales*, no se volverá a indicar dicho proceso a fin de evitar repeticiones innecesarias. Algo que sí que es necesario especificar es que los reactivos empleados en este caso son peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y ácido fórmico ( $CH_2O_2$ ), combinación aplicada en la digestión que consigue generar disoluciones acuosas de las muestras sólidas iniciales.

El desarrollo de este estudio se ha visto truncado al realizar la digestión de las diferentes muestras de suelo necesarias para completar el balance nutricional. Se han realizado varios procedimientos, empleando mezclas de reactivos diferentes en cada caso, pero los resultados logrados no han sido satisfactorios, ya que las muestras digeridas presentaban gran cantidad de partículas de tierra, indicador de que el proceso de digestión no se había completado correctamente. Incluso se ha probado a medir el contenido de nitratos y fosfatos de las muestras que presentaban un mejor aspecto, previa filtración de las mismas a fin de eliminar las partículas en suspensión, pero el resultado ofrecido por el cromatógrafo era confuso y en ningún caso determinante, ya que en el cromatograma, los picos obtenidos no estaban completamente resueltos, induciendo error en la concentración de las especies medidas.

Pese al esfuerzo realizado, no se ha podido completar el balance nutricional previsto inicialmente, no obstante, y dado que sí se dispone del análisis nutricional de las plantas cosechadas, se describirá, la técnica con la que se ha llevado a cabo esta determinación, así como los resultados alcanzados (mostrados en el siguiente capítulo 4. *RESULTADOS EXPERIMENTALES*).

#### **3.4.5.2.- Cromatografía líquida de alta eficacia (High performance liquid chromatography HPLC)**

La cromatografía es esencialmente un método físico de separación en el que los componentes a separar se distribuyen entre dos fases, una inmóvil (fase estacionaria), y otra móvil (fase móvil) la cual percola a través de la primera. La separación de los componentes de una mezcla (analitos), los cuales son arrastrados por la fase móvil a lo



largo del lecho estacionario, se produce debido a las diferencias en las constantes de distribución de los mismos entre la fase estacionaria y la móvil. A la distribución final de los componentes en función de su posición sobre la fase estacionaria, o del tiempo en que eluyen, se denomina cromatograma.

Según la naturaleza de la fase móvil existen dos técnicas instrumentales: Cromatografía gaseosa (CG) y cromatografía líquida (CL). Dada la naturaleza, iones inorgánicos no volátiles, de los analitos objetos de estudio, se ha seleccionado para la determinación de los mismos la CL. Entre las técnicas cromatográficas cuya fase móvil es un líquido la técnica HPLC es la más utilizada, presentando ciertas ventajas frente a la cromatografía de líquidos clásica: Permite una elevada resolución (picos más estrechos), mayor velocidad de análisis, mayor reproducibilidad debido al mayor control de los parámetros que afectan a la eficiencia de la separación, además de permitir la fácil automatización del equipo<sup>49</sup>. La siguiente figura muestra un esquema básico del proceso de CL:

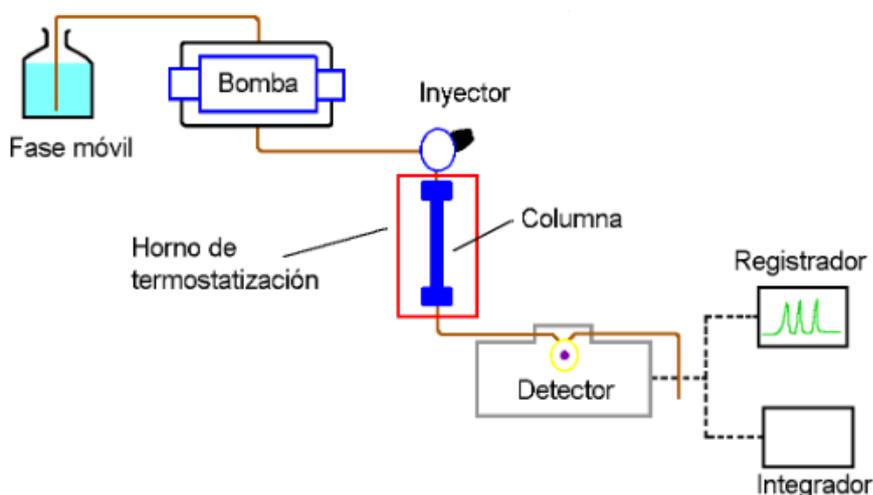
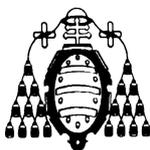


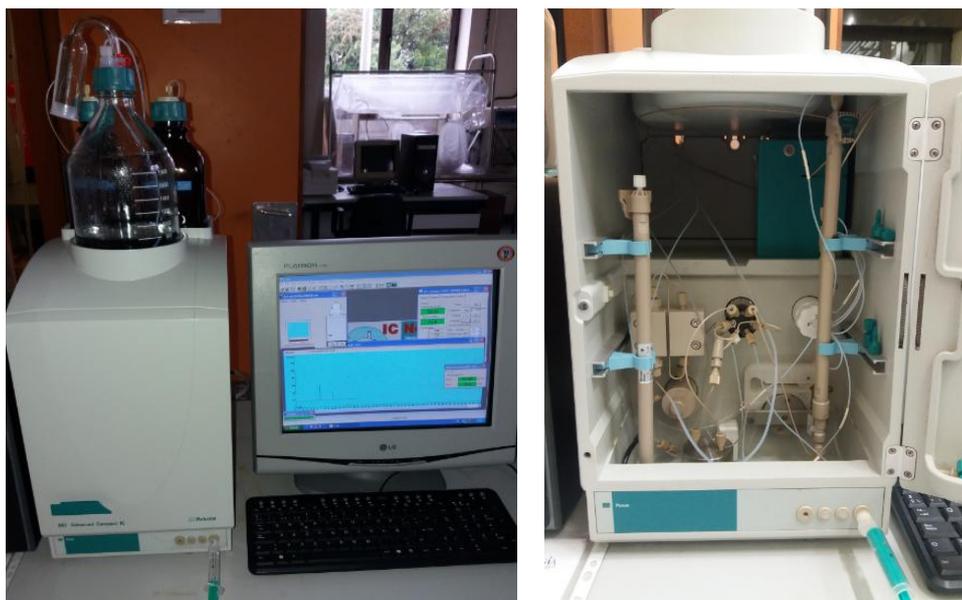
Figura 3.18 - Esquema de un cromatógrafo de líquidos (Fuente: *Cromatografía líquida de alta eficacia, CSIC*)

Las características del equipo empleado en la investigación son las que se indican a continuación: La fase móvil, (disolución acuosa de bicarbonato y carbonato sódico) que se

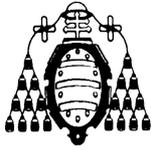
<sup>49</sup> Referencia: Apuntes de la asignatura *Técnicas Instrumentales aplicadas al Análisis químico y sensorial*. Máster: MBTA.



encuentra contenida en un recipiente de vidrio, es impulsada a través del equipo por una bomba de alta presión, concretamente de doble pistón. Una válvula rotatoria de seis vías, es el dispositivo que permite la inyección de volúmenes pequeños y reproducibles de muestra sin alterar el flujo de la fase móvil en la columna, que es el elemento fundamental de un CL, puesto que es en ella donde tiene lugar la separación de los componentes. El relleno de la columna lo forma la fase estacionaria, y en función de las características de ésta, se pueden distinguir diferentes tipos dentro de la HPLC. Para este caso en cuestión la cromatografía de intercambio iónico es la empleada en la determinación de nitratos y fosfatos en las muestras de plantas. El fundamento de este tipo de CL está basado en que la fase estacionaria está formada por un material sólido que presenta en su superficie grupos ionizados capaces de retener selectivamente a iones de signo contrario que circulan en la fase móvil. Finalmente se requiere de un sistema de detección colocado a la salida de la columna que proporcione de forma continua información acerca de la composición del flujo de la fase móvil que pasa a su través. El detector incorporado en el equipo utilizado en esta determinación, es un detector conductimétrico, que mide de manera continua la conductividad de la fase móvil que eluye de la columna, indicando la presencia de un analito por medio de un cambio en dicho parámetro. La integración el área de los picos cromatográficos que se obtienen al aplicar esta técnica permite obtener la concentración (mg/L) del analito presente en la muestra problema.



Fotografía 3.16 - Cromatógrafo líquido de alta eficacia, marca *Metrohm*, modelo *861 Advanced Compact IC*.



## 4. Resultados experimentales

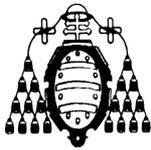
En este capítulo se describen los resultados experimentales obtenidos en el cultivo de la Lechuga Batavia mediante la aplicación de los dos fertilizantes objeto de estudio del presente documento: Estruvita y Mezcla de estruvita + fase sólida del digestato. Además, se hará una comparación de los resultados logrados en esta investigación, con aquellos obtenidos para la mejor dosis del digestato bruto y para el fertilizante comercial, desarrollados en un proyecto anterior.

Lo que se pretende es describir cual es el poder fertilizante de los abonos empleados, indicando además, si existen diferencias notorias en la aplicación de uno u otro en el cultivo de la Lechuga Batavia, a fin de determinar la opción técnicamente más viable, para una empresa que decida emplear este tipo de producto como fertilizante en el mercado comercial.

### 4.1.- SEGUIMIENTO FOTOGRÁFICO DEL DESARROLLO DE LOS CULTIVOS.

A lo largo de los dos meses que ha durado el cultivo de la especie vegetal seleccionada, se han tomado fotografías que permiten una inspección visual de los logros alcanzados semanalmente.

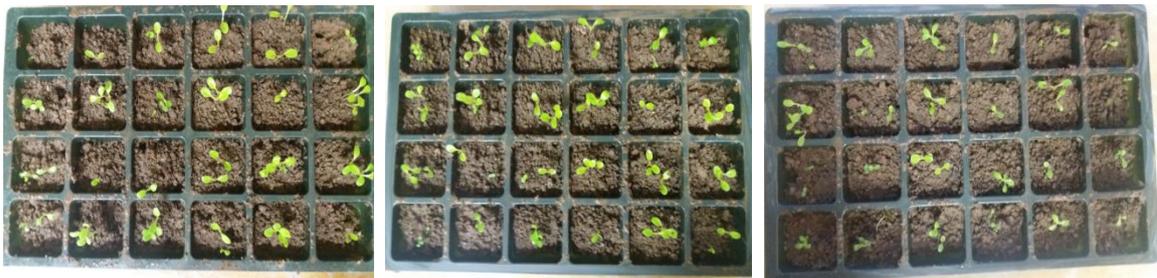
Las siguientes ilustraciones reflejan diferentes momentos del ciclo de cultivo, concretamente el aspecto alcanzado en las semanas 2, 5 y 8 (final del cultivo). En primer lugar se mostrarán los semilleros correspondientes a la mejor dosis del digestato bruto (D1t2), y al fertilizante comercial, seguidos de los resultados alcanzados para el testigo, para las dosis de la estruvita ensayadas, así como para las diferentes mezclas probadas en esta investigación.



Digestato D1t2

Fertilizante comercial

Testigo



ED1

ED2

ED3



M1 t0

M2 t0

M3 t0

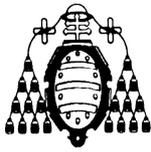


M1 t1

M2 t1

M3 t1

Fotografía 4.17 - Aspecto de los cultivos ensayados, 2 semanas desde la siembra.



Digestato D1t2



Fertilizante comercial



Testigo



ED1



ED2



ED3



M1 t0



M2 t0



M3 t0



M1 t1

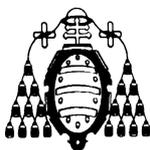


M2 t1



M3 t1

Fotografía 4.18 - Aspecto de los cultivos ensayados, 5 semanas desde la siembra.



Digestato D1t2



Fertilizante comercial



Testigo



ED1



ED2



ED3



M1 t0



M2 t0



M3 t0



M1 t1

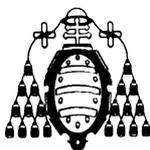


M2 t1



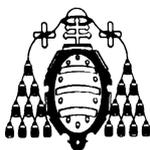
M3 t1

Fotografía 4.19 - Aspecto final de los cultivos ensayados, 8 semanas desde la siembra.



Como conclusiones al seguimiento visual del cultivo a través de las fotografías mostradas cabe destacar las siguientes:

- De forma general los ensayos fertilizados con estruvita y la mezcla de ésta con fase sólida, presentan un aspecto más favorable que aquellos ensayos correspondientes a la mejor dosis del digestato bruto y al fertilizante comercial. Este resultado, que se puede comprobar a simple vista sin necesidad de realizar ningún cálculo matemático, afianza la necesidad del tratamiento del digerido bruto para conseguir aumentar su poder fertilizante y por consiguiente su valor en el mercado.
- En la semana 2 desde el inicio de la plantación, se puede observar que las plantas obtenidas al utilizar las mezclas como abono son ligeramente mayores en las seis combinaciones probadas. Esto puede ser debido a que en estas mezclas los nutrientes se liberen más rápidamente en comparación con el resto de ensayos. A pesar de que la estruvita se engloba dentro de la categoría de fertilizantes inorgánicos, la presencia de una cantidad importante de nitrógeno amoniacal en su composición, el cual debe sufrir un proceso de oxidación biológica de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) para su aprovechamiento por parte del cultivo, permite una liberación progresiva del nitrógeno, elemento clave en el desarrollo de especies vegetales.
- En la semana 5 desde el inicio de la plantación, se observa como los dos tiempos ensayados en el caso de las mezclas, presentan diferencias notorias. Los cultivos que muestran un mejor aspecto son los correspondientes a la siembra de las semillas una vez preparada la mezcla ( $t_0$ ), ya que el tiempo de espera de 15 días desde la preparación del abono y la siembra, genera unos cultivos aparentemente con un menor número de plantas por semillero, en especial la M3t1, el peor de los ensayos probados en esta investigación, en cuanto a volumen de cultivo cosechado se refiere.
- Es posible que no se pueda apreciar con precisión la diferencia existente entre el testigo y los ensayos fertilizados con estruvita y mezcla, pero se puede afirmar



que los semilleros abonados presentaban un aspecto más vigoroso y un desarrollo mayor de las plantas obtenidas.

- El aspecto final logrado por los cultivos, a excepción del digestato y del fertilizante comercial, es bastante favorable, y no permite a simple vista, concluir con exactitud qué ensayos han resultado ser más satisfactorios. Para ello será necesario recurrir a métodos analíticos que permitan esa determinación.

La apariencia final de los cultivos no es la que presenta una hortaliza de este tipo, y debido a la necesidad de extraer las plantas para continuar con el desarrollo de la investigación, no se ha podido alargar el ciclo vegetativo. Sin embargo, a fin de analizar cuál sería el aspecto tras tres meses desde el inicio de la siembra, se ha seleccionado la mejor planta de cada ensayo para continuar con su crecimiento en un recipiente adecuado para tal fin. Cabe resaltar que esto mismo se ha realizado con la mejor dosis correspondiente al digestato bruto, pudiendo comparar así los resultados logrados en ambos proyectos:



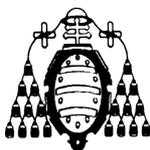
Digestato



D1, D2 y D3, respectivamente, de estruvita



M1, M2 y M3, respectivamente, correspondientes al tiempo t0



M1, M2 y M3,  
respectivamente,  
correspondientes al  
tiempo t1

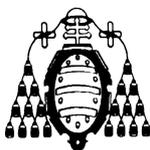
Fotografía 4.20 - Aspecto de los ensayos tras tres meses desde el inicio de la plantación.

Es difícil establecer una comparación entre las fotografías mostradas anteriormente, lo que sí se puede deducir es que continuando con el crecimiento de los cultivos, se puede llegar a obtener lechugas, con una apariencia similar a las encontradas en un supermercado, aunque cabe indicar que en ningún caso se ha logrado obtener un cogollo compacto típico de este tipo de hortaliza.

## 4.2. - MASA DE LAS PLANTAS COSECHADAS

Debido al gran volumen de datos analizados en este apartado, masas húmedas y secas de las plantas recogidas en cada alveolo y de cada ensayo probado en la investigación presente, los resultados obtenidos se pueden consultar en el Apéndice 8.5. del presente documento.

A fin de resumir las masas determinadas se han realizado dos tipos de promedios, masa promedio húmeda y seca, y masa promedio húmeda y seca por planta, la obtención de las mismas consiste en la suma de las masas recogidas para cada ensayo dividido entre el número total de réplicas para el primer caso, y para el segundo caso dividido entre el número de plantas recogidas en cada semillero. Los resultados numéricos son los que se muestran en la siguiente tabla, indicando además, las masas promedio logradas en los ensayos de la investigación anterior: Digestato D1t2 y fertilizante comercial, así como el número de plantas recolectadas en cada semillero.



Ensayo	Nº plantas	Masa promedio húmeda	Masa promedio seca	Masa promedio por planta (seca)
Digestato D1t2	26	1,73	0,09	0,08
Fertilizante Comercial	1	0,02	0,001	0,03
Testigo	58	2,73	0,16	0,07
ED1	46	4,98	0,24	0,12
ED2	49	6,34	0,29	0,14
ED3	42	4,30	0,19	0,11
M1t0	40	3,93	0,18	0,11
M2t0	38	4,73	0,24	0,15
M3t0	41	3,97	0,18	0,10
M1t1	40	4,69	0,22	0,13
M2t1	38	4,70	0,27	0,17
M3t1	20	2,42	0,14	0,16

Tabla 4.17 - Número de plantas recolectadas y masas (g) promedio de los ensayos comparados en la investigación.

Cabe indicar que serán los datos correspondientes a la masa promedio por planta húmeda, los que se emplearán en el cálculo de la eficiencia agronómica, a fin de determinar que ensayos han resultado ser más satisfactorios, dada la importancia que presentan estos valores se ha decidido mostrarlos a través de una representación gráfica (figura 4.19) y por eso no aparecen en la tabla anterior. El empleo de la masa húmeda en el cálculo de E.A., es debido a que es así como se consume la especie de cultivo estudiada en este proyecto, sin necesidad de realizar un proceso previo de secado (masa seca).

Analizando los datos del gráfico que se muestra a continuación, se observa como la masa media que presenta una planta de cada uno de los semilleros fertilizados con estruvita y mezcla es ligeramente superior a la correspondiente del ensayo con digestato bruto, es decir, para el mismo tiempo de cultivo, las plantas obtenidas al aplicar los fertilizantes probados en esta investigación se encuentran más desarrolladas. De las dosis estudiadas de estruvita, la ED2 se corresponde con el mejor ensayo probado para este abono, y en cuanto a las mezclas, los resultados obtenidos son muy similares entre sí, esto indica que las plantas recolectadas en estos semilleros son prácticamente iguales en cuanto a tamaño se refiere.

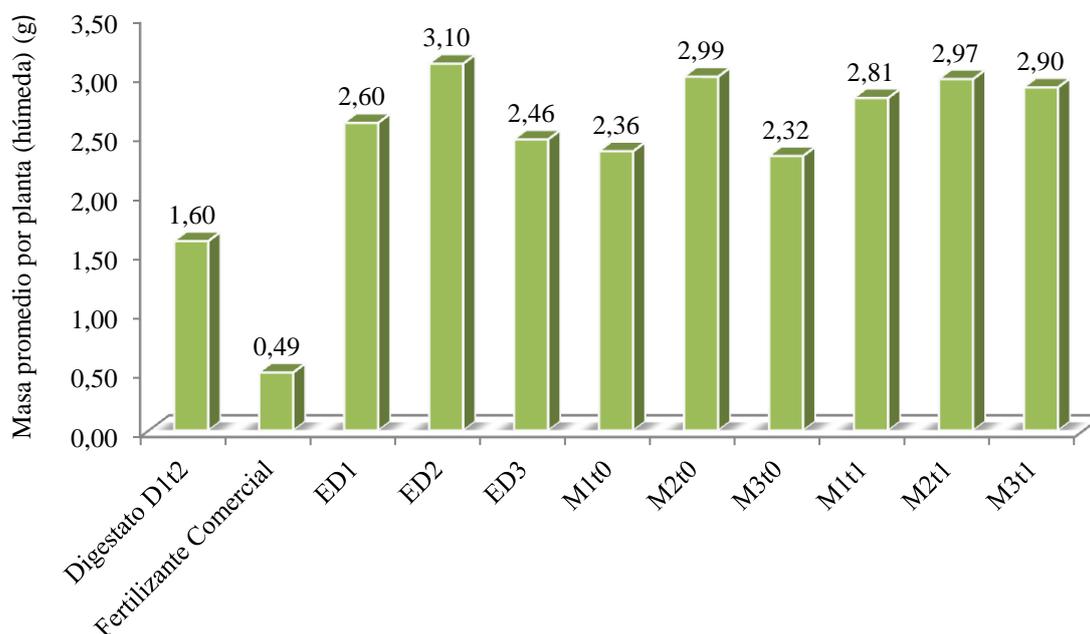
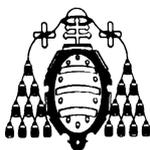


Figura 4.19 - Representación gráfica de la masa (g) promedio por planta húmeda de los ensayos comparados.

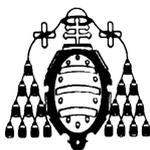
### 4.3.- DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA AGRONÓMICA

La fórmula empleada para el cálculo de este parámetro es la siguiente:

$$E. A. = \frac{\text{Ensayos evaluados} - \text{Fert. comercial}}{\text{Fert. comercial}} * 100 \quad (4.5)$$

Dónde:

- "E.A." son las iniciales de Eficiencia Agronómica, medida en porcentaje (%).
- "Ensayos evaluados" hace referencia a la masa (g) promedio por planta húmeda obtenida de cada ensayo del digestato bruto, de la estruvita y de las mezclas, así como de la masa promedio por planta húmeda del ensayo sin fertilización, testigo.
- "Fert. comercial" hace referencia a la masa promedio por planta húmeda (g) obtenida para el ensayo del fertilizante comercial.



NOTA: Las masas promedio por plantas húmedas a las que se hace referencia en la fórmula anterior, se corresponden con los datos representados en la figura 4.19.

Los resultados logrados se muestran en la siguiente figura:

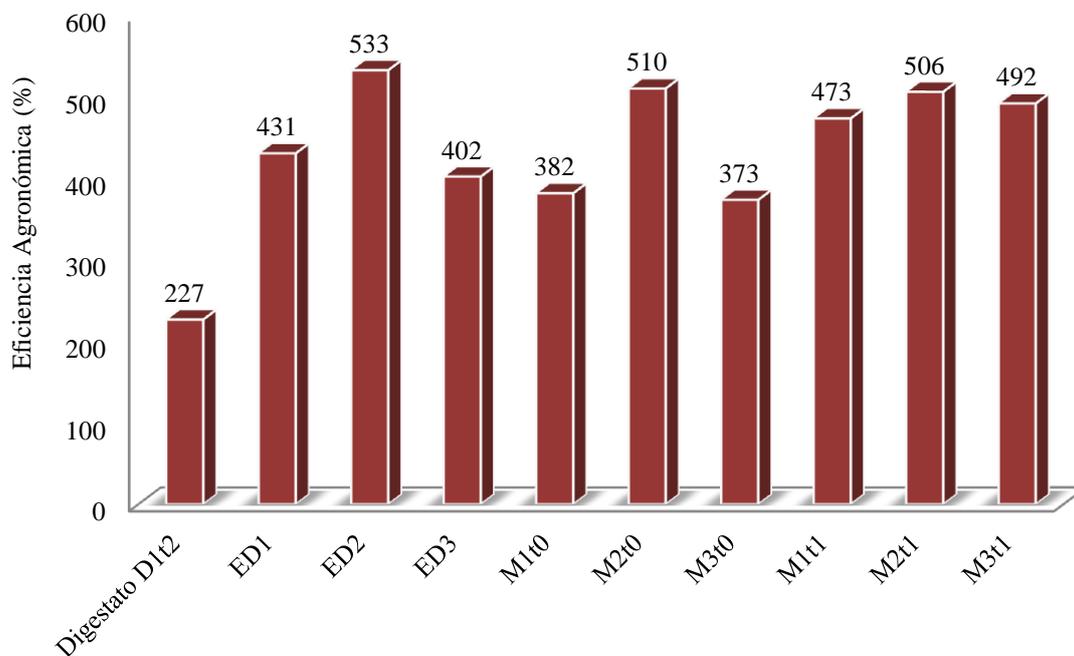
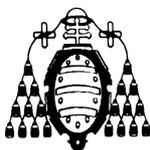


Figura 4.20 - Representación gráfica de la E.A. (%) de los ensayos comparados.

A la vista de los resultados se observa como las tres dosis de estruvita probadas, así como, cualquiera de las mezclas realizadas, suponen un mejor comportamiento agronómico que la dosis del digestato bruto (cantidad de 0,37 kg digestato bruto/semillero asociada al tiempo de siembra t2, es decir, se realiza la siembra de las semillas a los 30 días del abonado la tierra) tomando como referencia el ensayo del fertilizante comercial. Esta primera conclusión ya se intuía al observar las fotografías tomadas semanalmente del crecimiento de los cultivos. Esto resulta satisfactorio desde el punto de vista del desarrollo de esta investigación, ya que respalda con datos numéricos, la importancia que tiene la manipulación del digestato bruto a fin de obtener otros materiales que también se puedan emplear como abonos en agricultura, pero que presenten una capacidad de fertilización mayor que la lograda con el digerido, traduciéndose esto en un mayor beneficio económico. Es importante tener siempre presente, que el producto del que se parte en la obtención, tanto de la estruvita como de la fase sólida, se considera una corriente secundaria del proceso biotecnológico, digestión anaerobia, cuyo objetivo final no es la



obtención del digestato bruto sino la generación de biogás, por tanto, es necesario que el beneficio obtenido con la venta de estos materiales fertilizantes suponga una inversión rentable, teniendo en cuenta los costes de producción de los mismos.

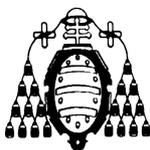
Centrándose en los resultados logrados para los fertilizantes estudiados en este proyecto, se observa cómo la dosis 2 de estruvita presenta los mejores resultados de los ensayos realizados, obteniendo un valor de eficiencia agronómica del 533%. Esta dosis se corresponde con el valor de 10,9 g estruvita/semillero obtenido aplicando una reducción del 20% con respecto a la dosis óptima. En cuanto a las mezclas se observa que las combinaciones probadas presentan valores similares entre sí, aunque es la mezcla 2, formada por un 40% de estruvita y un 60% de fase sólida, la que mejor comportamiento agronómico presenta. Cabe indicar que las E.A. de esta mezcla asociadas a los tiempos de siembra t0 y t1 son muy parecidas, aunque la M2t0 es ligeramente superior. Se ha seleccionado este ensayo, M2t0, como el mejor de los probados para el fertilizante mezcla, no solo por presentar el valor más alto en la E.A., sino que también se ha tenido en cuenta un motivo técnico, y es que las características del ensayo permiten el abonado de la tierra y la siembra de las semillas el mismo día, reduciendo el tiempo de trabajo necesario para el cultivo de la especie vegetal.

Estos resultados afianza la necesidad de una mayor regulación legislativa española en cuanto a la producción y comercialización del digerido bruto, así como de sus derivados, quedando aquí demostrado sus efectos fertilizantes.

#### **4.4. - ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS**

Con el objetivo de corroborar los resultados obtenidos a partir del cálculo de la E.A., se ha incluido este apartado que recoge un análisis estadístico básico aplicado sobre las masas húmedas determinadas.

En primer lugar se muestra un resumen estadístico descriptivo del conjunto de valores seleccionados para este estudio, indicando además los resultados logrados al analizar si el comportamiento de las variables numéricas sigue una distribución normal.



Ensayo	Nº datos válidos	Media	Mediana	Desviación típica	p-valor (Test Shapiro-Wilk)	Normalidad
T	22	2,975	3,039	0,775	0,650	Si
ED1	22	5,436	5,199	2,515	0,387	Si
ED2	23	6,614	6,880	2,093	0,621	Si
ED3	21	4,916	4,808	2,530	0,818	Si
M1t0	20	4,718	4,949	2,589	0,279	Si
M2t0	23	4,939	5,220	1,676	0,172	Si
M3t0	19	5,011	5,078	2,349	0,800	Si
M1t1	19	5,920	5,881	1,941	0,407	Si
M2t1	18	6,270	6,933	2,520	0,079	Si
M3t1	10	5,807	4,607	3,305	0,176	Si

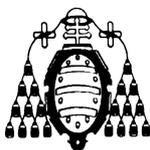
Tabla 4.18 - Resumen de los parámetros estadísticos analizados.

A la vista de los resultados se observa en primer lugar, que el número de datos válidos, es decir, el número de alveolos en los que se recogió cultivo de cada semillero, es bastante similar entre todos los ensayos analizados, a excepción de M3t1, del que solo se dispone diez datos.

En el Apéndice 8.6. del presente documento se muestran varios diagramas de distribución de frecuencias (histogramas de frecuencias), uno para cada ensayo analizado, sobre los que se representa la curva normal, a fin de probar visualmente la normalidad de los datos. Cabe mencionar que estos gráficos solo se muestran a modo ilustrativo, será necesaria la aplicación de un test de normalidad para corroborar dicha característica en los datos analizados, tal y como se indica a continuación.

Se comprueba aplicando el test de Shapiro-Wilk, que todos los ensayos siguen una distribución normal, dado que el p-valor obtenido para cada uno de ellos es mayor que el nivel de significación establecido previamente, y cuyo valor es de  $\alpha = 0,05$ . Aceptada la normalidad de todos los ensayos probados, se procede a aplicar la prueba T para muestras independientes, contraste que permitirá determinar qué ensayo, estadísticamente, resulta más satisfactorio dentro de los estudiados para cada fertilizante.

Este análisis se ha dividido en dos partes, por un lado la comparación entre los ensayos probados para la estruvita, y por otro, la comparación de los ensayos probados para las mezclas, en ambos se ha incluido el ensayo del testigo.



En el caso de la ESTRUVITA los resultados logrados al aplicar esta prueba son los siguientes:

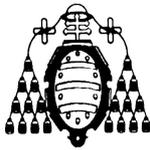
Muestra 1	Muestra 2	p-valor	Igualdad de promedios	Intervalos de confianza al 95% para la diferencia de promedios	
				Límite inferior	Límite superior
T	ED1	0	No	-3,6163	-1,3047
T	ED2	0	No	-4,5937	-2,6827
T	ED3	0,003	No	-3,1309	-0,7501
ED1	ED2	0,094	Si	-2,5661	0,2108
ED1	ED3	0,503	Si	-1,0340	2,0741
ED2	ED3	0,019	No	0,2901	3,1055

Tabla 4.19 - Prueba T para muestras independientes, ESTRUVITA.

Existen dos tipos de información diferentes en la tabla anterior, por un lado, la determinación de si los ensayos analizados, de dos en dos, muestran evidencias de que sus medias son similares entre sí, es decir, si los ensayos, a efectos estadísticos, se pueden considerar iguales. Solo en las combinaciones ED1-ED2 y ED1-ED3 no se rechaza la hipótesis nula, por tanto se puede asumir la igualdad de promedios entre ambos ensayos. Y, por otro lado, además de esta conclusión, la prueba T incluye los intervalos de confianza al 95% para la diferencia de promedios, cabe resaltar que aquellos que contienen el valor cero, se corresponden con los ensayos en los que se ha aceptado la igualdad de promedios. A partir de los intervalos recogidos en la tabla anterior se puede concluir con certeza que:

- Los contrastes en los que el límite superior se encuentre más a la derecha, la primera población, a la que hace referencia el par analizado, va a ser mejor que la segunda (datos marcados en verde).
- Y, los contrastes en los que el límite inferior se encuentre más a la izquierda, la segunda población, a la que hace referencia el par analizado, va a ser mejor que la primera (datos marcados en verde).

De esta forma se puede comprobar que el ensayo ED2 es el mejor de los analizados, a efectos estadísticos, resultado, que por otro lado, concuerda con el obtenido a partir de la E.A.

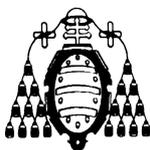


En caso de las MEZCLAS, los resultados alcanzados se muestran en la siguiente tabla donde se puede observar que, a excepción de las parejas en las que uno de los dos ensayos comparados es el testigo, se acepta la igualdad de promedios entre las combinaciones analizadas, al no rechazar la hipótesis nula ( $p$ -valor obtenido mayor que el nivel de significación establecido  $\alpha=0,05$ ). Notar que en estos pares de ensayos el valor cero se encuentra dentro de intervalo de confianza.

Finalmente, actuando de forma similar a como se ha procedido con la estruvita, se obtiene que es la M2t1 el mejor de entre los ensayos realizados con el fertilizante estruvita + fase sólida, pero dada la aceptación de la igualdad de promedios entre ambos (celdas moradas), se considerará como resultado final la M2t0 como la mejor de las probadas en esta investigación, por la misma razón que la explicada anteriormente.

Muestra 1	Muestra 2	p-valor	Igualdad de promedios	Intervalos de confianza al 95% para la diferencia de promedios	
				Límite inferior	Límite superior
T	M1t0	0,008	No	-2,9905	-0,4940
T	M2t0	0	No	-2,7520	-1,1754
T	M3t0	0,02	No	-3,2065	-0,8647
T	M1t1	0	No	-3,9276	-1,9622
T	M2t1	0	No	-4,5819	-2,0065
T	M3t1	0,024	No	-4,2076	-0,4557
M1t0	M2t0	0,745	Si	-1,5994	1,1565
M1t0	M3t0	0,714	Si	-1,8999	1,3133
M1t0	M1t1	0,111	Si	-2,6934	0,2881
M1t0	M2t1	0,07	Si	-3,2366	0,1327
M1t0	M3t1	0,33	Si	-3,3415	1,1627
M2t0	M3t0	0,909	Si	-1,3294	1,1857
M2t0	M1t1	0,086	Si	-2,1091	0,1467
M2t0	M2t1	0,064	Si	-2,7419	0,0809
M2t0	M3t1	0,447	Si	-3,2913	1,5555
M3t0	M1t1	0,202	Si	-2,3269	0,5083
M3t0	M2t1	0,125	Si	-2,8836	0,3664
M3t0	M3t1	0,458	Si	-2,9645	1,3725
M1t1	M2t1	0,639	Si	-1,8457	1,1471
M1t1	M3t1	0,922	Si	-2,3536	2,5802
M2t1	M3t1	0,681	Si	-1,8208	2,7460

Figura 4.21 - Prueba T para muestras independientes, MEZCLA.



#### 4.5. - ESPECIES QUÍMICAS INORGÁNICAS (METALES)

La determinación de las seis especies químicas inorgánicas (seis metales) se ha llevado a cabo en los cultivos de tres ensayos diferenciados: testigo y ensayos ED2, M2t0 (mejores experimentos de los probados para la estruvita y la mezcla respectivamente). Además se dispone de los resultados logrados en la investigación anterior sobre el digestato bruto. Con esta información se pretende comparar el contenido en metales de los ensayos objeto de estudio del presente documento y analizar si el aporte de estos nuevos fertilizantes supone un aumento o no en el contenido de dichos elementos en las plantas cosechadas.

Por otro lado, se ha llevado a cabo la determinación de los seis metales en varias muestras de tierra (con y sin abono) a fin de realizar un balance de materia sobre los mismos.

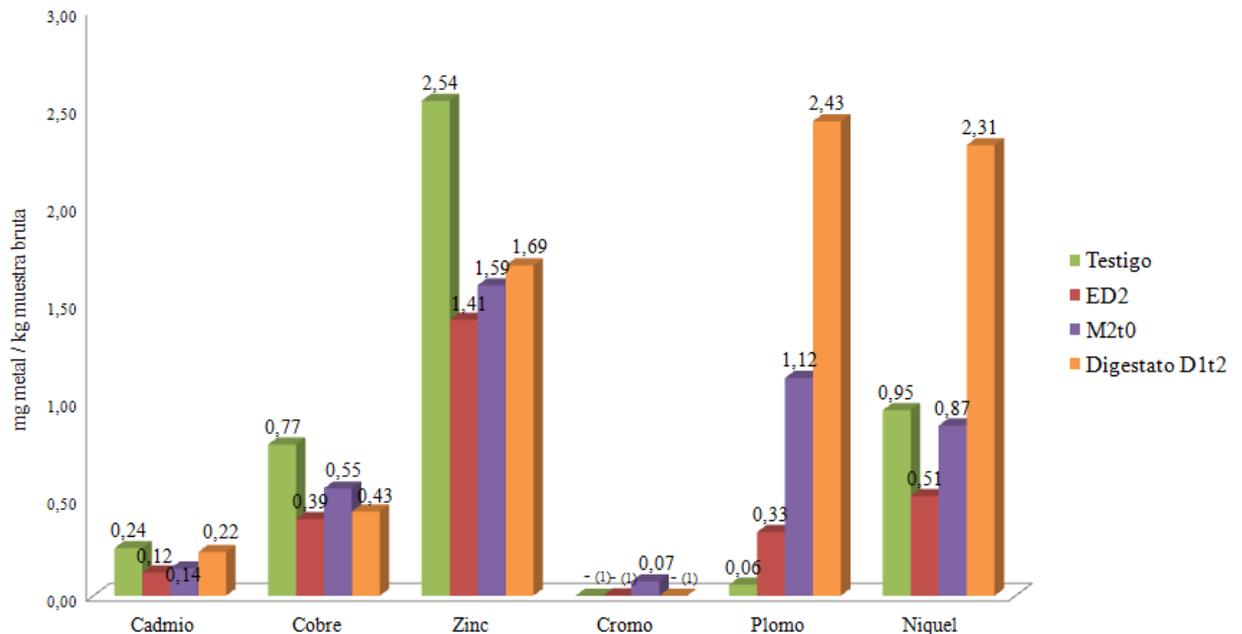
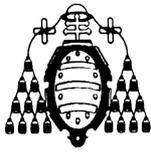
Para poder desarrollar estos estudios se calcula la masa de metal por muestra (en base húmeda y seca), expresada como mg metal/kg muestra, a partir de los datos obtenidos en el equipo de medida, expresados en mg/L (Apéndice 8.7.), de la masa (en base húmeda y seca) del contenido recogido en cada alveolo, expresada en kg (Apéndice 8.5.), y del volumen de las muestras (20 mL); según la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mg metal}}{\text{kg muestra (húmeda/seca)}} = \text{media} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times \frac{\text{volumen muestra (L)}}{\text{masa(húmeda/seca) (kg)}} \quad (4.6)$$

La comparación del contenido en metales de las plantas cosechadas de los ensayos T, ED2 y M2t0, se realizará en base bruta, es decir a partir de la masa húmeda recogida de cada alveolo. Teniendo en cuenta esta condición, los resultados que se obtienen al aplicar la fórmula anterior se recogen en el Apéndice 8.8.

*NOTA: Los resultados logrados al aplicar la fórmula 4.6 (en base bruta) para el digestato D1t2, mejor ensayo de la investigación anterior, se muestran en el Apéndice 8.9.*

Una vez adecuadas las unidades, será necesario establecer un valor promedio para cada uno de los metales analizados en cada uno de los ensayos que se pretenden comparar, mostrados en la siguiente figura:

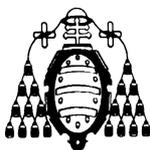


(1) Valor inferior al límite de detección del equipo.

Figura 4.22 - Cantidad de metales promedio presentes en los mejores ensayos probados en la lechuga Batavia.

A continuación se resumen las conclusiones que se pueden extraer a partir del gráfico anterior:

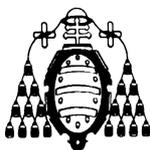
- El metal que se encuentra en menor cantidad en las plantas recogidas es el cromo, el cual sólo se detecta en la mezcla M2t0, aunque el valor promedio es insignificante.
- El contenido de metales existente en las plantas fertilizadas con digestato, supera la cantidad presente en los ensayos desarrollados con estruvita y mezcla, en especial para los metales plomo y níquel. Este resultado refuerza la necesidad del tratamiento del digerido bruto a fin de obtener materiales fertilizantes derivados del mismo, que no solo permiten aumentar el poder fertilizante, sino que la aplicación de estos abonos supone una disminución en el contenido de metales presentes en las plantas, con respecto al digestato bruto. Cabe mencionar que para el caso concreto del cobre, es la M2t0 la que presenta un contenido superior en este metal en comparación con la estruvita y el ensayo del digestato, no obstante los valores son pequeños y muy similares entre sí.



- Comparando los resultados logrados para los ensayos fertilizados, con el contenido presente en las plantas del testigo, se observa como la aplicación de cualquier fertilizante no supone un aumento en el contenido de los metales cadmio, cobre y zinc en las plantas cosechadas.
- Es importante resaltar que el plomo, tóxico para el ser humano, presenta unos valores excesivamente altos en las plantas obtenidas a partir de ensayos fertilizados, en comparación con las correspondientes al testigo.

En base a este análisis, los ensayos fertilizados que presentan un menor contenido de metales en los cultivos recogidos son los correspondientes a la estruvita y la mezcla, no existiendo diferencias muy significativas entre ambas, aunque cabe resaltar que son las plantas fertilizadas con estruvita, las que presentan un contenido ligeramente inferior, algo esperable ya que en las mezclas, es la fase sólida y no la estruvita, la que aporta mayor cantidad de metales, lo que se traduce en la disponibilidad, en el caso de los ensayos fertilizados con mezcla, de un mayor contenido de los mismos para las plantas. Además la aplicación de estos abonos no supone un aumento de la cantidad de metales presentes en las plantas, en comparación con el contenido existente en el cultivo del testigo. Para el caso concreto del plomo, la situación es diferente, las plantas procedentes de ensayos fertilizados contienen mayor cantidad de este metal, en especial las correspondientes al digestato bruto y a la mezcla, que aquellas procedentes del testigo (ensayo sin aplicar abono), sería conveniente, a la vista de los resultados, la repetición de las medidas del plomo a fin de comprobar que no se haya producido algún error experimental en la determinación del mismo (debido al tiempo limitado disponible para el desarrollo de este proyecto, no se ha podido realizar esta comprobación).

A fin de determinar si el contenido de metales presente en los cultivos hace que no sea posible la ingesta de los mismos, se ha consultado en la bibliografía límites máximos permitidos de metales en productos alimentarios, concretamente en la lechuga Batavia. De los metales analizados en esta investigación, solo el cadmio y el plomo se encuentran sujetos a legislación europea, debido a la peligrosidad que suponen para la salud humana, por su elevada toxicidad y capacidad de acumulación en el organismo. Según el



Reglamento 1881/2006<sup>50</sup>, por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios, y teniendo en cuenta el Reglamento 420/2011<sup>51</sup>, que introduce ciertas modificaciones al reglamento primero, el contenido máximo, expresado en mg metal / kg peso fresco, estipulado para la especie vegetal estudiada, es de 0,05 mg Cd / kg peso fresco y de 0,1 mg Pb / kg peso fresco.

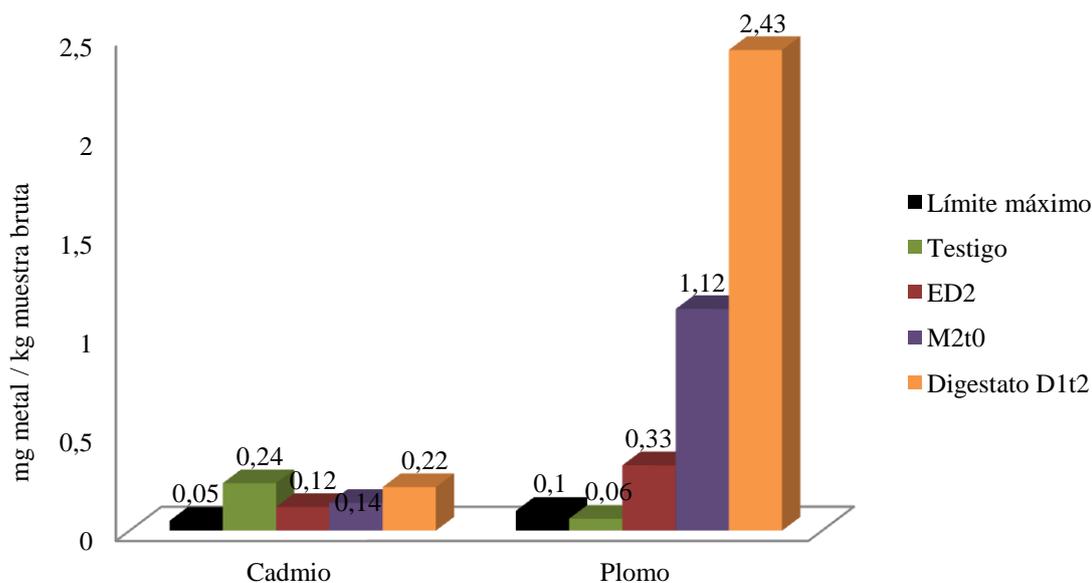
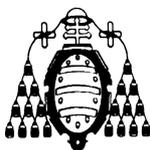


Figura 4.23 - Comparación del contenido en metales de los mejores ensayos en la lechuga Batavia con los límites establecido en la normativa europea vigente.

Analizando la figura anterior se observa como el contenido en Cadmio presente en los ensayos realizados supera el límite máximo permitido. Es importante destacar el contenido de Cd presente en las plantas que se han obtenido sin ningún tipo de abono (testigo). Esto hace pensar que la presencia de este metal en las plantas no es debido al uso de estos fertilizantes, si no a su presencia en la tierra usada en los ensayos.

<sup>50</sup> Reglamento 1881/2006, de 19 de diciembre de 2006, por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios. <https://www.boe.es/doue/2006/364/L00005-00024.pdf>

<sup>51</sup> Reglamento 420/2011, de 29 de abril de 2011, que modifica el Reglamento 1881/2006. <https://www.boe.es/doue/2011/111/L00003-00006.pdf>



En el caso del plomo, y de acuerdo al Artículo 1 de la legislación consultada, los productos alimenticios que sobrepasen el contenido máximo de alguno de los contaminantes establecidos en la misma, como es el caso del plomo, no se podrán comercializar; por tanto a fin de proteger la salud pública se debe concluir que no será posible la ingesta de estas hortalizas fertilizadas con digestato bruto y materiales obtenidos a partir del mismo si no se reduce la presencia de este metal en los cultivos.

*NOTA: La tabla 8.39 del Apéndice 8.10 muestra el contenido promedio de los metales estudiados en la tierra sin abonar empleada en la investigación, es necesario resaltar el alto contenido de cada metal presente en la misma, lo que lleva a pensar que el no cumplimiento de la legislación no es responsabilidad única de la fertilización aplicada, sino que la tierra empleada para el desarrollo de la investigación no fue la ideal, desde el punto de vista de la cantidad de metales que contiene.*

La determinación del contenido de los seis metales en la tierra de cultivo empleada en la investigación, se ha aplicado sobre tres situaciones diferentes: Tierra sin abonar, tierra abonada con ED2 y tierra abonada con M2t0, en estos dos últimos casos se refiere a la tierra en las condiciones finales de cultivo de la especie vegetal, es decir, análisis de la tierra una vez extraídas las plantas. El objetivo de este estudio, tal y como se indicaba al comienzo de este apartado, es la realización de un balance de materia aplicado a los metales, el cual está basado en la igualdad entre el contenido de metales presentes al inicio de la plantación y el contenido al final de la misma.

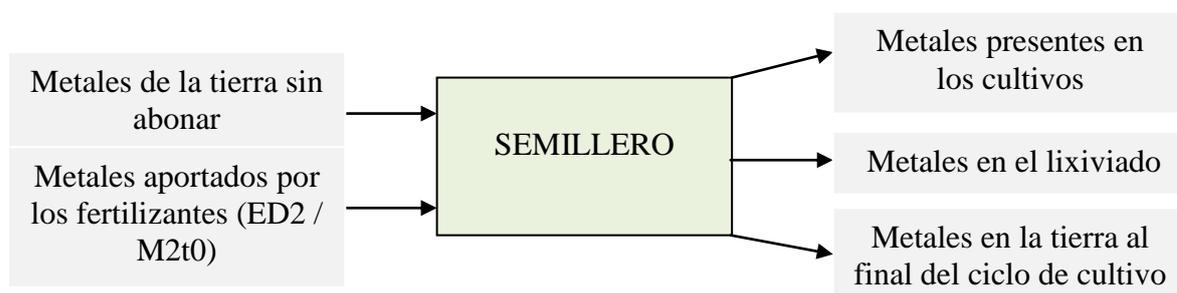
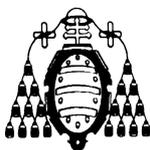


Figura 4.24 - Esquema general del balance de metales aplicado a los ensayos ED2 y M2t0.

Será necesario establecer un valor promedio de cada metal por semillero para el desarrollo del balance, a continuación se especifica, para cada caso, como se ha obtenido dicho promedio.



La determinación del contenido en metales de los tres casos estudiados de tierra (tierra sin abonar, tierra al final del cultivo de ED2, tierra al final del cultivo de M2t0), permite obtener, a partir de la media aritmética ofrecida por equipo de EAA, de la masa de tierra de cada réplica y del volumen de las muestras (25 mL), el contenido de cada metal en unidades mg metal / kg muestra seca (fórmula 4.6), dado que se dispone de cinco réplicas para cada metal analizado, se realizará un promedio de las mismas. Los datos a los que se hace referencia se muestran en el Apéndice 8.10. del presente documento. A fin de obtener la cantidad de cada metal (mg) en cada semillero (tablas 4.20 y 4.21), se deberá tener en cuenta las cantidades de muestra que se añadieron en cada caso:

- Tierra sin abonar: 1,8 kg tierra / semillero
- Tierra final del cultivo ED2: 1,81 kg (tierra +E) / semillero
- Tierra final del cultivo M2t0: 1,83 kg (tierra+E+FS) / semillero

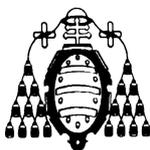
La cantidad de metales aportados por los fertilizantes, en unidades mg metal / semillero (tabla 4.20 y 4.21), se obtiene a partir de la composición agronómica de los abonos (tabla 2.3) y de las cantidades que se han empleado de los mismos en el cálculo de las dosificaciones, recordando estos valores, eran:

- 10,9 g estruvita / semillero para el ensayo ED2
- Y, una combinación de 40%E - 60%FS para el ensayo M2t0 (13,5 g estruvita / semillero + 20,4 g FS / semillero).

Finalmente, dado que el balance que se está planteando es en base seca, será necesario obtener un valor promedio de los metales presentes en las plantas en función de la masa seca de las mismas.

Cabe indicar que no ha sido posible analizar la presencia de metales extraídos por lixiviación del semillero, como consecuencia del riego.

La información necesaria para aplicar el balance en cuestión se resume a continuación:



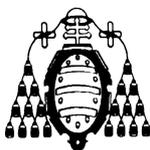
ED2				
Metal	Metales al inicio del cultivo		Metales al final del cultivo	
	Tierra sin abonar	Fertilizante ED2	Tierra una vez extraídas las plantas	Plantas cosechadas
	Unidad: mg metal / semillero			
Cadmio	3,67	-	3,24	0,0181
Cromo	104,51	-	79,38	0,0002
Cobre	91,57	0,0001	76,11	0,0601
Níquel	102,74	0,0009	76,07	0,0777
Plomo	117,39	0,0389	73,43	0,0502
Zinc	254,86	-	243,95	0,2159

Tabla 4.20 - Contenido en metales presente en condiciones iniciales y finales para el ensayo ED2.

M2t0				
Metal	Metales al inicio del cultivo		Metales al final del cultivo	
	Tierra sin abonar	Fertilizante M2t0	Tierra una vez extraídas las plantas	Plantas cosechadas
	Unidad: mg metal / semillero			
Cadmio	3,67	0,2179	3,66	0,0166
Cromo	104,51	0,2301	80,56	0,0074
Cobre	91,57	1,1454	80,41	0,0627
Níquel	102,74	0,9161	85,19	0,1039
Plomo	117,39	2,0520	97,37	0,1358
Zinc	254,86	2,5200	246,61	0,1915

Tabla 4.21 - Contenido en metales presente en condiciones iniciales y finales para el ensayo M2t0.

Para finalizar y completar el balance solo es necesario sumar las cantidades que hay de cada metal por semillero en las condiciones iniciales y finales, y observar si se cumple la igualdad:



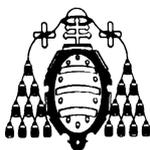
BALANCE			
Metal	Metales al inicio del cultivo		Metales al final del cultivo
ED2			
Cadmio	3,7	=	3,3
Cromo	104,5	=	79,4
Cobre	91,6	=	76,2
Níquel	102,7	=	76,1
Plomo	117,4	=	73,5
Zinc	254,9	=	244,2
M2t0			
Cadmio	3,9	=	3,7
Cromo	104,7	=	80,6
Cobre	92,7	=	80,5
Níquel	103,7	=	85,3
Plomo	119,5	=	97,5
Zinc	257,4	=	246,8

Tabla 4.22 - Balance de metales en los ensayos ED2 y M2t0.

A la vista de los resultados obtenidos, las diferencias observadas en las determinaciones realizadas antes y después del cultivo (los metales presentes en las condiciones finales del cultivo son menores que los correspondientes a las condiciones iniciales) están justificadas, ya que el riego periódico al que han sido sometidos los dos ensayos durante el crecimiento de la especie vegetal, ha provocado la lixiviación de los metales. Dado que no es posible la determinación del contenido en metales del lixiviado generado en cada ensayo, se asume que la diferencia existente en el balance es debido a este motivo.

#### 4.6. - NUTRIENTES (N y P)

El contenido nutricional de las plantas cosechadas, sería interesante analizarlo sobre aquellas cuyo aspecto final fuese el típico de una hortaliza del tipo estudiado, según esto y dado que los cultivos recogidos al cabo de dos meses no se encuentran completamente desarrollados, se ha decidido aplicar este estudio sobre las mejores plantas de los ensayos ED2 y M2t0 (mejores experimentos probados en este proyecto), para las cuales se ha alargado el ciclo de cultivo un mes más (plantas mostradas en la fotografía 4.21). Cabe



indicar que no será posible la comparación de los resultados logrados en estos ensayos, con los que le corresponderían al digestato bruto ya que no se dispone de información sobre el contenido en nutrientes para los ensayos realizados con este abono.

Las partes de la planta que se han tomado como muestra, han sido aquellas destinadas al consumo, es decir las hojas. Para cada ensayo probado (ED2 y M2t0) se han realizado tres réplicas a fin de lograr una mayor representación del cultivo en cuestión.

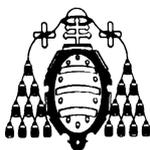
Los cromatogramas ofrecidos por el equipo al inyectar las muestras en el mismo, se recogen en el Apéndice 8.11. del presente documento. En estas representaciones gráficas se muestra la evolución de la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en función del tiempo (min). El propio sistema informático permite la integración de los picos cromatográficos resultantes, obteniendo como resultado la concentración (mg/L) de los iones inorgánicos analizados (nitratos  $\text{NO}_3^-$  / fosfatos  $\text{PO}_4^{3-}$ ). Dado que el objetivo final es conocer la concentración de nitrógeno y fósforo total que está presente en las muestras, será necesario modificar las unidades aplicando los factores de conversión que se muestran a continuación:

$$N_t = \frac{\text{media } \frac{\text{mg NO}_3^-}{\text{L}} \times \frac{14 \text{ mg N}}{62 \text{ mg NO}_3^-} \times \text{Volumen (L)}}{\text{media masa húmeda (g)}} = \frac{\text{mg N}}{\text{g planta húmeda}} \quad (4.7)$$

$$P = \frac{\text{media } \frac{\text{mg PO}_4^{3-}}{\text{L}} \times \frac{31 \text{ mg P}}{95 \text{ mg PO}_4^{3-}} \times \text{Volumen (L)}}{\text{media masa húmeda (g)}} = \frac{\text{mg P}}{\text{g planta húmeda}} \quad (4.8)$$

Dónde para ambas ecuaciones:

- "Media" Hace referencia a la media aritmética (mg nitrato-fosfato / L) de los datos mostrados en los cromatogramas, de las tres réplicas analizadas para cada ensayo.
- "Volumen (L)" Volumen de muestra preparada para medir en el equipo, 0,025 L.
- "Media masa húmeda (g)" Media aritmética de la masa húmeda de las tres réplicas analizadas para cada ensayo.



Los datos de las medias correspondientes en cada caso, a los que se ha hecho referencia con anterioridad, quedan recogidos en la siguiente tabla:

Ensayo	Media masa húmeda (g)	Media Nitratos (mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L)	Media Fosfatos (mg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L)
ED2	3,039	299,1	101,4
M2t0	2,466	204,1	80,8

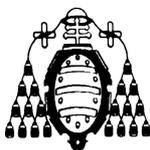
Tabla 4.23 - Medias aritméticas de diversos parámetros: masa húmeda / concentración de nitratos / concentración de fosfatos.

Finalmente, desarrollando las fórmulas 4.7 y 4.8 con los datos mostrados en la tabla anterior, se determina el contenido en nutrientes de las plantas desarrolladas en esta investigación, más concretamente el contenido en nitrógeno y fósforo total, los resultados son los que se muestran a continuación:

Ensayo	Contenido nutricional	
	Nitrógeno	Fósforo
	Unidad: mg N ó P / masa (g) húmeda de planta	
ED2	0,556	0,272
M2t0	0,467	0,267

Tabla 4.24 - Contenido en nutrientes de la mejor planta del ensayo ED2 y del ensayo M2t0.

A pesar de que este estudio no se ha podido completar, debido a los motivos expuestos en el capítulo anterior, como conclusión de los resultados obtenidos se puede comentar que el contenido en nutrientes de las plantas recogidas de ambos ensayos, cuyas condiciones de cultivo han sido idénticas (riego, condiciones climáticas y período de crecimiento de tres meses), es el mismo en cuanto a los resultados logrados para el fósforo, y similar para el caso del nitrógeno, presentando el ensayo de la estruvita un contenido en este nutriente, ligeramente superior, que el correspondiente al ensayo de la mezcla. En base a esta conclusión, no se podría determinar, empleando como parámetro de referencia el contenido en nutrientes, que fertilizante resultaría más beneficioso emplear.



Por último sería interesante comparar los resultados alcanzados en esta investigación con la composición nutricional establecida en la bibliografía para la Lechuga Batavia, concretamente se han tenido en cuenta los valores recogidos en un artículo de la *Fundación Española de la Nutrición*, datos mostrados con anterioridad en el presente documento. (Capítulo 2, apartado 2.6.- *ESPECIE DE CULTIVO: LECHUGA BATAVIA*).

Será necesario expresar los resultados obtenidos en este proyecto, en las mismas unidades de medida que vienen recogidas en el artículo consultado, además destacar que no se dispone de valor de referencia para el nitrógeno total, ya que la importancia que presenta este elemento, con respecto a la nutrición del ser humano, radica en su relación con el contenido proteico, por ello será necesario transformar el nitrógeno total, obtenido experimentalmente, en valor proteico, a partir de la suposición de que la proporción que representa el nitrógeno en las proteínas es aproximadamente del 16%.

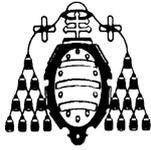
*NOTA: Se considera que la masa húmeda de planta, unidad por la que se expresa el contenido en nutrientes de los ensayos, recogido en la tabla 4.24, es igual a la masa comestible del alimento.*

Se resumen a continuación los resultados logrados, así como el valor de referencia consultado:

Ensayo	Contenido nutricional	
	Proteína (g)	Fósforo (mg)
	Por 100 g de masa comestible	
Referencia	1,5	30
ED2	0,35	27,2
M2t0	0,29	26,7

Tabla 4.25 -Comparación del contenido nutricional de la mejor planta del ensayo ED2 y del ensayo M2t0 con los datos bibliográficos.

A la vista de los resultados se concluye que el contenido nutricional en relación al fósforo se asimila al estipulado en la bibliografía, a diferencia de lo que ocurre con el contenido proteico de los ensayos analizados, el cual se encuentra por debajo del valor de referencia consultado.



## 5. Conclusiones

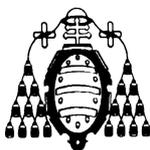
En base al objetivo principal de la investigación presentada en este documento, el cual queda definido en el título de la misma: "*Comparación del efecto fertilizante de productos derivados del digestato obtenido en la digestión anaerobia de residuos de supermercado*" las conclusiones más relevantes que se pueden extraer una vez finalizado el período experimental se resumen a continuación:

A pesar de que el digestato bruto, obtenido como corriente secundaria del proceso biotecnológico, digestión anaerobia, empleando como materia prima una mezcla de residuos alimentarios, presenta cualidades para su inclusión dentro del mercado de los abonos (afirmación que se corrobora con los resultados logrados en una investigación previa a la mostrada en este documento), es necesario su tratamiento a fin de mejorar el poder fertilizante del mismo. A partir de esta cuestión surgen los productos fertilizantes estudiados en este proyecto, estruvita y mezcla preparada con estruvita y fase sólida del digestato.

El seguimiento fotográfico del crecimiento de los cultivos muestra que la aplicación, tanto de las diferentes dosis de estruvita estudiadas como de las diferentes mezclas probadas, suponen un aumento en el rendimiento de la cosecha, ya que las plantas recogidas en estos ensayos presentaban un aspecto más favorable y desarrollado, que las correspondientes a los ensayos: digestato bruto (0,37 kg digestato / semillero) y fertilizante comercial (7,8 g FC / semillero).

Esta primera conclusión se corroboró a partir del cálculo de la eficiencia agronómica, que permitió además, establecer qué ensayo ha resultado ser más satisfactorio de los analizados para cada uno de los productos fertilizantes probados en esta investigación:

- **ESTRUVITA: ED2** → Este ensayo se corresponde con la cantidad de 10,9 g estruvita /semillero, obtenida aplicando una reducción del 20% con respecto a la dosis óptima.
- **MEZCLAS: M2t0** → Este ensayo se corresponde con una combinación de 40% de estruvita (13,5 g E / semillero) más 60% de fase sólida del



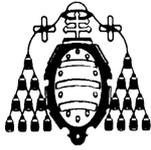
digestato bruto (20,4 g FS / semillero), y en el que se siembra las semillas a continuación del abonado de la tierra ( $t_0$ ).

El estudio estadístico de las masas húmedas cosechadas reveló la misma información que la eficiencia agronómica, teniendo en cuenta la aceptación de la igualdad de promedios entre los ensayos comparados.

En cuanto al estudio de las especies inorgánicas, metales, presentes en los cultivos cabe resaltar tres cuestiones básicas:

- Las plantas fertilizadas con digestato bruto contienen, en general, una cantidad más elevada de los metales analizados, en comparación con los presente en los cultivos de ED2 y M2t0.
- Las plantas fertilizadas con los productos derivados del digestato bruto, presentan un contenido de los metales analizados menor, en comparación con los presentes en las plantas cultivadas sin fertilizar (testigo); lo que implica que la aplicación de estos abonos no supone un aumento del contenido de metales en las plantas cosechadas
- Los niveles promedio alcanzados para el Cd y Pb en las plantas fertilizadas con digestato, estruvita y mezcla, sobrepasan los límites establecidos en la legislación vigente, impidiendo la ingesta de los cultivos. No obstante, el balance desarrollado, reveló el elevado contenido que existe de metales en la tierra sin abonar empleada en la investigación, motivo por el que puede ser posible que se haya producido el incumplimiento de la normativa.

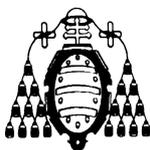
A pesar de las dificultades acaecidas en la determinación de los nutrientes, nitrógeno y fósforo, en la tierra de cultivo, se ha podido determinar el contenido nutricional de las plantas cosechadas para ED2 y M2t0, el cual es aceptable en relación a la cantidad de fósforo pero deficiente en cuanto a su contenido proteico.



## 6. Símbolos

En este capítulo se indica el significado de los símbolos más relevantes empleados en esta investigación:

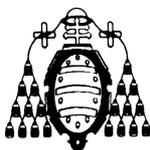
- SANDACH: "Subproductos Animales no Destinados al Consumo Humano"
- SPSS: "Statistical Package for the Social Sciences ( Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales)"
- $H_0$ : "Hipótesis nula"
- $H_1$ : "Hipótesis alternativa"
- E.A.: "Eficiencia Agronómica"
- EAA: "Espectrometría de Absorción Atómica"
- HPLC: "*High performance liquid chromatography* (Cromatografía líquida de alta eficacia) "
- CG: "Cromatografía gaseosa"
- CL: "Cromatografía líquida"
- ND: "No detectado"



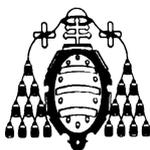
## 7. Bibliografía

### 7.1.- DOCUMENTOS Y ARTÍCULOS

1. *Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos*, Comisión Europea, Bruselas, páginas 2-3, 2011.
2. *Como Alimentar al Mundo 2050*, Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO), páginas 2-4.
3. *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*, Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO), 2009.
4. *Estrategia "Más alimento, menos desperdicio"*, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA).
5. *Más de los que nos podemos permitir*, Revista Medio Ambiente para los Europeos, Comisión Europea, 2016.
6. **A. Laca Pérez** *Tratamiento de Efluentes y Residuos de la Industria Alimentaria*. Aprovechamiento de residuos, apuntes del Máster MBTA, 2017.
7. *Informe anual del ejercicio 2015 FERTIBERIA S.A.* páginas 20-27.
8. *Forecast of food, farming and fertilizer use in the European Union 2016-2026*, Fertilizers Europe, páginas 2-8.
9. **C. Abad** *Consumo de fertilizantes en España-2016*, FERTIBERIA S.A. 2017.
10. *Los fertilizantes y su uso*, Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO), páginas 10-26, 2002.
11. **P. García-Serrano, J.J. Lucena, S. Ruano, M. Nogales** *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, páginas 14-62, 2009.
12. *Guía para el manejo eficiencia de la nutrición de las plantas*, Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO), páginas 4-5, 1999.
13. **A. Vian Ontuño** *Introducción a la Química Industrial*. Tema 10: La roca fosfática como materia prima, págs. 261-273.
14. **A. María González Cabrera** *Estudio Técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia*, páginas 22-27, 2014, Sevilla.
15. *Valorización energética: producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos / subproductos orgánicos agroindustriales*, AINIA, Parque Tecnológico de Valencia.
16. *El sector del Biogás agroindustrial en España*, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, páginas 4-13, Madrid 2010.



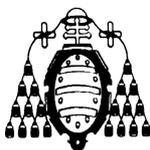
17. **C. Lukehurst, T. Al Seadi** *Quality management of digestate from biogas plants used as fertiliser*. IEA Bioenergy, páginas 4-7, 2012.
18. **A. Pascual** *Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España PROBIOGAS*, páginas 7-10, 2009.
19. **M.P. Bernal, J. Antonio Alburquerque, M. Ángeles Bustamante, R. Clemente**, *Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometamización PROBIOGAS*, páginas 1-62, 2011.
20. **C. Pérez Mata** Trabajo Fin de Grado: "*Pruebas de fertilización con digestato obtenido en la digestión anaerobia de residuos de supermercado*" Grado en Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, 2016.
21. **H. Saveyn, P. Eder** *End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals*, European Commission, páginas 39-40 / 141-142, Sevilla 2014.
22. **M. Dolores Hidalgo Barrio** *Estruvita: Ese oro blanco procedente de los residuos*, 2014.
23. **E. Rama** *Estruvita, el problema que se convirtió en solución*, 2014.
24. *Orientación sobre el Nuevo Marco Legal de los SANDACH*, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, páginas 5-17, Madrid 2013.
25. **A. López Martínez** *Calidad y Autenticidad de Pimiento y Lechuga cultivados bajo sistemas de producción sostenibles*, páginas 5-7, 2014.
26. *Lechuga (Lactuca sativa L.)*, Fundación Española de la Nutrición.
27. **Fernando O. García, M. Fernanda González Sanjuan** *La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos?*, 2013.
28. **V. González, F. Pomares** *La fertilización y el balance de nutrientes en sistemas agroecológico*, páginas 3-9, Valencia 2008.
29. **J.L. Matheus, J. Caracas, Montilla, O. Fernández** *Eficiencia Agronómica relativa de tres abonos orgánicos (vermicompost, compost, y gallinaza) en plantas de maíz*. Laboratorio de Investigación de Suelos. Departamento de Ciencias Agrarias. NURR-ULA, Trujillo 2007.
30. **M. Aguado Canela** *Cómo realizar "paso a paso" un contraste de hipótesis con SPSS para Windows y alternativamente con EPIINFO y EPIDAT: (II) Asociación entre una variable cuantitativa y una categoría (comparación de medias entre dos o más grupos independientes)*, Sevilla.
31. Material de apoyo SPSS, Grado en Marketing, Facultad de Economía y Empresa, Murcia, páginas 2-17, 2012-2013.
32. **M. Cuesta, F.J. Herrero** Apuntes del curso: *Introducción al uso de la estadística descriptiva con SPSS*, Universidad de Oviedo, 2015-2016.



33. **S. A. Guarín Torres** *Efecto del Cromo en las plantas*, 2012.
34. **E. Acevedo, M. A. Carrasco, O. León, E. Martínez, P. Silva, G. Castillo, I. Ahumada, G. Borie, S. González** Informe: *Criterios de Calidad de suelo Agrícola*, Ministerio de Agricultura SAG, páginas 66-78 / 99-120, 2005.
35. **M. Barbazán** *Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencia de nutrientes*, Facultad de Agronomía, páginas 3-4 / 16-18, Uruguay 1998.
36. **M.L. Fernández** *Técnicas instrumentales aplicadas al análisis químico y sensorial*, apuntes del Máster MBTA, 2017.
37. *Cromatografía líquida de alta eficacia*, Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

## 7.2.- NORMATIVA

1. *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.*  
<https://www.boe.es/boe/dias/2011/07/29/pdfs/BOE-A-2011-13046.pdf>
2. *Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen disposiciones relativas a la comercialización de los productos fertilizantes con el mercado CE.*  
<https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2016/ES/1-2016-157-ES-F1-1.PDF>
3. *Reglamento (CE) nº 2003/2003 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de octubre de 2003, relativo a los abonos.*  
<http://www.boe.es/doue/2003/304/L00001-00194.pdf>
4. *Reglamento (CE) nº 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.*  
<https://www.boe.es/doue/2009/300/L00001-00033.pdf>
5. *Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.*  
<https://www.boe.es/boe/dias/2013/07/10/pdfs/BOE-A-2013-7540.pdf>
6. *Reglamento (CE) nº 1881/2006, de 10 de diciembre de 2006, por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios.*  
<https://www.boe.es/doue/2006/364/L00005-00024.pdf>
7. *Reglamento (UE) nº 420/2011, de la Comisión de 29 de abril de 2011, que modifica el Reglamento (CE) nº 1881/2006.*  
<https://www.boe.es/doue/2011/111/L00003-00006.pdf>



### 7.3.- PÁGINAS WEB

En este apartado además de recoger las páginas web consultadas a lo largo de la elaboración de este documento, se indica la última fecha de consulta de las mismas:

1. Información sobre el proyecto piloto de EMULSA. (10/07/2017)  
<http://cuidadoambiental.gijon.es/noticias/show/34967-la-campana-informativa-de-la-recogida-organica-finaliza-esta-semana-en-nuevo-gijon>
2. Propuesta de un nuevo Reglamento de Fertilizantes CE (10/07/2017)  
<https://aeifa-agronutrientes.org/propuesta-de-un-nuevo-reglamento-de-fertilizantes-ce>
3. Información sobre los equipos empleados en la investigación (11/07/2017)

Balanza:

[http://www.mt.com/dam/mt\\_ext\\_files/Editorial/Generic/4/AT\\_TeZ\\_0x000010083f814b3340009e92\\_files/at-mt-umt-tez-sp-703468.pdf](http://www.mt.com/dam/mt_ext_files/Editorial/Generic/4/AT_TeZ_0x000010083f814b3340009e92_files/at-mt-umt-tez-sp-703468.pdf)

Estufa:

<http://www.equilab.es/pdf/ESTUFAS%20Y%20HORNOS.pdf> (página 10 del documento)

Digestor:

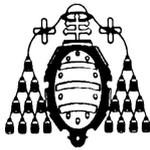
<https://www.milestonesrl.com/es/digesti%C3%B3n.html>

Espectrómetro de absorción atómica:

<http://www.directindustry.es/prod/perkinelmer-inc/product-14711-1656407.html>

Cromatógrafo líquido de alta eficacia:

<https://www.manualshelf.com/manual/metrohm/861-advanced-compact-ic/manual-english/page-11.html>



## 8. Apéndices

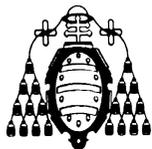
### 8.1.- CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUVITA Y FASE SÓLIDA

Los datos mostrados a continuación, han servido como punto de partida en la determinación de las dosificaciones necesarias de ambos fertilizantes, siendo necesaria la adecuación de los datos según las unidades especificadas en la normativa consultada.

ESTRUVITA (base seca)			FASE SÓLIDA (base húmeda)		
Parámetro	Valor		Parámetro	Valor	
Densidad (kg/L)	1,61		Densidad (kg/L)	1,5	
Humedad (%)	36,89		Sólidos Totales (g/kg)	291,48	
N amoniacal (mg/kg)	53,38		Sólidos Volátiles (g/kg)	133,06	
Nitratos (mg/kg)	2,95		N amoniacal (mg/kg)	34,1	
Nitritos (mg/kg)	1,28				
<b>Nutrientes</b>	g/kg	% masa	<b>Nutrientes</b>	g/kg	% masa
N total	57,16	5,72	N total	0,3	0,03
P total	126,42	12,64	P total	0,53	0,053
<b>Metales</b>	mg/L		<b>Metales</b>	mg/L	
Cd	ND*		Cd	14,02	
Cr	ND*		Cr	14,80	
Cu	0,021		Cu	73,67	
Ni	0,134		Ni	58,85	
Pb	5,741		Pb	128,87	
Zn	ND*		Zn	162,09	
As	ND*		As	ND*	
Hg	ND*		Hg	ND*	
Fe	8,513		Fe	1167,23	
Al	1,732		Al	10,13	
Ca	ND*		Ca	2226,21	
Na	ND*		Na	1406,70	
Mg	99,181		Mg	446,98	
Co	0,583		Co	53,68	
Mn	0,513		Mn	90,71	
K	0,454		K	656,62	

ND\*: no detectado

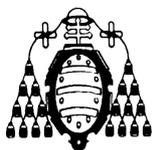
Tabla 8.26 - Caracterización de la estruvita y fase sólida.



### 8.2.- PLANIFICACIÓN TEMPORAL DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Nº	Nombre de la Tarea	DURACIÓN																									
		ene-17				feb-17				mar-17				abr-17				may-17				jun-17				jul-17	
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26
1	Planificación de la propuesta del Proyecto (recopilación de información y cálculo de dosificaciones de abonos)	x	x	x																							
2	Ciclo de cultivo					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						
3	Testigo					x	x	x	x	x	x	x	x														
4	3 Dosis de Estruvita					x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>(2)</sup>	x <sup>(2)</sup>	x <sup>(2)</sup>	x <sup>(2)</sup>										
5	Mezclas a t0						x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>(2)</sup>												
6	Mezclas t1								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>(2)</sup>	x <sup>(2)</sup>	x <sup>(2)</sup>	x <sup>(2)</sup>						
7	Determinación de la masa cosechada																	x									
8	Estudio analítico (eficiencia agronómica)																			x							
9	Estudio estadístico (IBM-SPSS)																			x							
10	Determinación de especies químicas inorgánicas (metales)																				x	x					
11	Determinación de nutrientes (N y P)																					x	x	x	x	x	
12	Análisis y discusión de resultados logrados																	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
13	Redacción del Trabajo Fin de Máster																	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

- <sup>(1)</sup> El ciclo de cultivo del testigo y de la estruvita comenzó en la semana 4 de enero, dado que las condiciones climatológicas acaecidas en este período impidieron el crecimiento inicial de las plantas, se decidió volver a repetir estos ensayos a principio de febrero.  
 - <sup>(2)</sup> Las casillas marcadas en rojo hacen referencia al aumento del ciclo de cultivo, un mes más, de las mejores plantas de cada ensayo probado.



### 8.3.- DOSIFICACIÓN DE DIGESTATO BRUTO Y FERTILIZANTE COMERCIAL

En la siguiente tabla se indica la cantidad de digestato bruto que se empleó para el cultivo de la Lechuga Batavia por semillero, teniendo en cuenta que en este experimento se probó tres tiempos de siembra diferentes, t0, t1 y t2, la cantidad que requiere cada dosis será el triple de la cantidad expuesta para cada semillero. Fue la dosis 1 asociada el tiempo de siembra t2, el ensayo que resultó ser el más beneficioso de los estudiados para el digerido bruto.

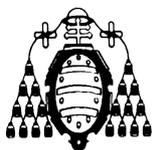
Digestato bruto			
Unidad	Dosis 1	Dosis 2	Dosis 3
kg / semillero	0,37	0,29	0,44
kg/ dosis	1,11	0,87	1,32

Tabla 8.27 - Dosificación de digestato bruto por semillero y dosis.

El fertilizante comercial se trata de un abono que posee una fórmula equilibrada, ideal para el abonado de cualquier planta. Es un abono de mezcla NPK (10-5-8), esto indica que cada gramo de producto contiene 0,1g, 0,05g y 0,08g de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente, en las formas químicas en las que estos componentes se expresan. Según la etiqueta del producto, es una formulación que además de contener magnesio y azufre, dispone de un 25% de nitrógeno de liberación lenta (urea formaldehído) simulando el efecto presente en los fertilizantes orgánicos. La cantidad de este fertilizante necesaria para cumplir con la exigencia de nitrógeno en el cultivo de la especie vegetal estudiada es de 7,8 g / semillero.



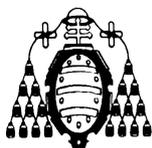
Fotografía 8.28 - Fertilizante químico comercial.



## 8.4.- FICHAS INTERNACIONALES DE SEGURIDAD QUÍMICA DE LOS REACTIVOS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN

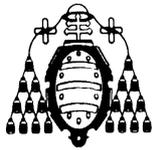
### Fichas Internacionales de Seguridad Química

ÁCIDO NÍTRICO		ICSC: 0183 Octubre 2006	
CAS: RTECS: NU: CE Índice Anexo I: CE / EINECS:	7697-37-2 QU5775000 2031 007-004-00-1 231-714-2	Ácido nítrico concentrado (70%) HNO <sub>3</sub> Masa molecular: 63,0	    
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible pero facilita la combustión de otras sustancias. En caso de incendio se desprenden humos (o gases) tóxicos e irritantes. El calentamiento intenso puede producir aumento de la presión con riesgo de estallido.	NO poner en contacto con sustancias inflamables. NO poner en contacto con productos químicos combustibles u orgánicos.	En caso de incendio en el entorno: NO espuma.
EXPLOSIÓN	Riesgo de incendio y explosión en contacto con muchos compuestos orgánicos frecuentes.		En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN		¡EVITAR TODO CONTACTO!	¡CONSULTAR AL MÉDICO EN TODOS LOS CASOS!
Inhalación	Sensación de quemazón. Tos. Dificultad respiratoria. Jadeo. Dolor de garganta. Síntomas no inmediatos (ver Notas).	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Posición de semiincorporado. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica inmediatamente.
Piel	Quemaduras cutáneas graves. Dolor. Decoloración amarilla.	Guantes de protección. Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor. Quemaduras..	Pantalla facial o protección ocular combinada con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad). Proporcionar asistencia médica inmediatamente.
Ingestión	Dolor de garganta. Dolor abdominal. Sensación de quemazón en la garganta y el pecho. Shock o colapso. Vómitos.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	NO provocar el vómito. Dar a beber uno o dos vasos de agua. Reposo. Proporcionar asistencia médica.
DATOS IMPORTANTES			
<b>ESTADO FÍSICO; ASPECTO</b> Líquido incoloro a amarillo, de olor acre.  <b>PELIGROS QUÍMICOS</b> La sustancia se descompone al calentarla suavemente, produciendo óxidos de nitrógeno. La sustancia es un oxidante fuerte y reacciona violentamente con materiales combustibles y reductores, p.ej. turpentina, carbón, alcohol. La sustancia es un ácido fuerte, reacciona violentamente con bases y es corrosiva para los metales, formando gas combustible (hidrógeno-ver FISQ:0001). Reacciona violentamente con compuestos orgánicos.  <b>LÍMITES DE EXPOSICIÓN</b> TLV: 2 ppm como TWA, 4 ppm como STEL; (ACGIH 2006). MAK: lib (no establecido pero hay datos disponibles) (DFG 2008).		<b>VÍAS DE EXPOSICIÓN</b> Efectos locales graves por todas las vías de exposición.  <b>RIESGO DE INHALACIÓN</b> Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar muy rápidamente una concentración nociva en el aire.  <b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN</b> La sustancia es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. Corrosiva por ingestión. La inhalación puede causar edema pulmonar (ver Notas). Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata (ver Notas).  <b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA</b> Los pulmones pueden resultar afectados por la exposición prolongada o repetida al vapor. La sustancia puede afectar a los dientes, dando lugar a erosión dental.	
PROPIEDADES FÍSICAS			
Punto de ebullición: 121°C Punto de fusión: -41,6°C Densidad relativa (agua = 1): 1,4 Solubilidad en agua: miscible Presión de vapor, kPa a 20°C: 6,4 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2,2		Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1,07 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0,21	
DATOS AMBIENTALES			
NOTAS			
Está indicado un examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto hasta que han pasado unas pocas horas o incluso días y se agravan con el esfuerzo físico. Esta Ficha ha sido parcialmente actualizada en enero de 2008: ver Límites de exposición.			

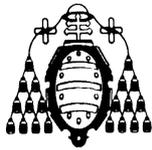


## Fichas Internacionales de Seguridad Química

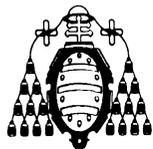
PERÓXIDO DE HIDRÓGENO EN SOLUCIÓN >60%		ICSC: 0164 Abril 2000	
CAS: 7722-84-1 RTECS: Ver Notas NU: 2015 CE Índice Anexo I: 008-003-00-9 CE / EINECS: 231-765-0		Hidroperóxido Dióxido de hidrógeno Dióxido de dihidrógeno Agua oxigenada $H_2O_2$ Masa molecular: 34.0	
		 	
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible. La sustancia puede prender materiales combustibles. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión.	NO poner en contacto con agentes combustibles o reductores. NO poner en contacto con superficies calientes.	En caso de incendio en el entorno: agua en grandes cantidades, pulverización con agua.
EXPLOSIÓN	Riesgo de incendio y explosión en contacto con calor o catalizadores metálicos.		En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN		¡EVITAR LA FORMACION DE NIEBLA DEL PRODUCTO! ¡EVITAR TODO CONTACTO!	¡CONSULTAR AL MEDICO EN TODOS LOS CASOS!
Inhalación	Dolor de garganta. Tos. Vértigo. Dolor de cabeza. Náuseas. Jadeo.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Posición de semiincorporado. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Corrosivo. Manchas blancas. Enrojecimiento. Quemaduras cutáneas. Dolor.	Guantes de protección. Traje de protección.	Aclarar con agua abundante, después quitar la ropa contaminada y aclarar de nuevo. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Corrosivo. Enrojecimiento. Dolor. Visión borrosa. Quemaduras profundas graves.	Gafas ajustadas de seguridad o pantalla facial.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Dolor de garganta. Dolor abdominal. Distensión abdominal. Náuseas. Vómitos.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Proporcionar asistencia médica.
DATOS IMPORTANTES			
<b>ESTADO FÍSICO; ASPECTO</b> Líquido incoloro.		<b>VÍAS DE EXPOSICIÓN</b> La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor y por ingestión.	
<b>PELIGROS QUÍMICOS</b> La sustancia se descompone al calentarla suavemente o bajo la influencia de la luz, produciendo oxígeno, que aumenta el peligro de incendio. La sustancia es un oxidante fuerte y reacciona violentamente con materiales combustibles y reductores causando peligro de incendio o explosión particularmente en presencia de metales. Ataca a muchas sustancias orgánicas, ej. textiles y papel.		<b>RIESGO DE INHALACIÓN</b> Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.	
<b>LÍMITES DE EXPOSICIÓN</b> TLV: 1 ppm (como TWA), A3 (ACGIH 2004). MAK: 0,5 ppm, 7,1 mg/m <sup>3</sup> . Categoría de limitación de pico: I(1). Cancerígeno: categoría 4, Riesgo para el embarazo: grupo C (DFG 2005).		<b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN</b> La sustancia es corrosiva para los ojos y la piel. El vapor irrita el tracto respiratorio. La ingestión de esta sustancia puede producir burbujas de oxígeno (embolia) en la sangre, dando lugar a shock.	
		<b>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA</b> Los pulmones pueden resultar afectados por la inhalación de concentraciones altas. La sustancia puede afectar al cabello, dando lugar a decoloración.	
PROPIEDADES FÍSICAS			
Punto de ebullición: 141°C (90%), 125°C (70%) Punto de fusión: -11°C (90%), -39°C (70%) Densidad relativa (agua = 1): 1.4 (90%), 1.3 (70%) Solubilidad en agua: miscible Presión de vapor, kPa a 20°C: 0.2 (90%), 0.1 (70%) Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1		Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.0 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -1.36	
DATOS AMBIENTALES			
La sustancia es tóxica para los organismos acuáticos.			
NOTAS			
Enjuagar la ropa contaminada con agua abundante (peligro de incendio). RTECS MX900000 se refiere a solución >90%; MX0887000 se refiere a solución >30%. Otros números NU: 2014 (disolución acuosa al 20-60% de peróxido de hidrógeno): clase de peligro 5.1, riesgo subsidiario 8, grupo de envasado II; 2984 (disolución acuosa al 8-20% de peróxido de hidrógeno): clase de peligro 5.1, grupo de envasado III. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en octubre de 2005: ver Límites de exposición, Clasificación UE, Respuesta de Emergencia.			



<p style="text-align: center;">FLUORURO DE HIDROGENO Acido fluorhídrico Acido hidrofúorico anhidro HF Masa molecular: 20.0</p>			
<p>Nº CAS 7664-39-3 Nº RTECS MW7875000 Nº ICSC 0283 Nº NU 1052 Nº CE 009-002-00-6</p>			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	No combustible. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión.	(Véanse Riesgos Químicos).	En caso de incendio en el entorno: usar medio de extinción adecuado.
<b>EXPLOSION</b>			En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua pero NO en contacto directo con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
<b>EXPOSICION</b>		¡EVITAR TODO CONTACTO!	¡CONSULTAR AL MEDICO EN TODOS LOS CASOS!
<b>• INHALACION</b>	Sensación de quemazón, vértigo, dolor de cabeza, tos, dificultad respiratoria, náusea, jadeo, vómitos, dolor de garganta, síntomas no inmediatos: ver Notas	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semiincorporado y proporcionar asistencia médica.
<b>• PIEL</b>	¡PUEDE ABSORBERSE! Enrojecimiento, dolor, ampollas, quemaduras graves. (Ver Inhalación)	Guantes protectores y traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y proporcionar asistencia médica.
<b>• OJOS</b>	Enrojecimiento, dolor, quemaduras profundas graves.	Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
<b>• INGESTION</b>	Dolor abdominal, náuseas, debilidad, sensación de quemazón, diarrea, vómitos y colapso.	No comer, ni beber ni fumar durante el trabajo. Lavarse las manos antes de comer.	Enjuagar la boca, NO provocar el vómito y proporcionar asistencia médica.
DERRAMAS Y FUGAS		ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. Eliminar el gas con agua pulverizada. Traje hermético de protección química incluyendo equipo autónomo de respiración.		A prueba de incendio. Separado de alimentos y piensos. Ver Peligros Químicos. Mantener en lugar fresco y bien ventilado.	No transportar con alimentos y piensos. CE: símbolo T+, símbolo C R: 26/27/28-35 S: (1/2-)/9-26-36/37/39-45 Clasificación de Peligros NU: 8 Riesgos Subsidiarios NU: 6.1 Grupo de Envasado NU: I
<b>D A T O S F I S I C O S</b>	<p><b>ESTADO FISICO; ASPECTO</b> Gas o líquido humeante incoloro, de olor acre.</p> <p><b>PELIGROS FISICOS</b></p> <p><b>PELIGROS QUIMICOS</b> La disolución en agua es un ácido fuerte, reacciona violentamente con bases y es corrosiva. Reacciona violentamente con muchos compuestos originando peligro de fuego y explosión. Ataca al metal, vidrio, plásticos, caucho y revestimientos.</p> <p><b>LIMITES DE EXPOSICION</b> TLV (como F): 0.5 ppm como TWA, 2 ppm (valor techo) BEI (ACGIH 2005). MAK: 1 ppm, 0.83 mg/m<sup>3</sup>; Categoría de limitación de pico: I(2). Riesgo para el embarazo: grupo C; BAT: 7 mg/g creatinina (DFG 2005)</p>	<p><b>VIAS DE EXPOSICION</b> La sustancia se puede absorber por inhalación y a través de la piel y por ingestión.</p> <p><b>RIESGO DE INHALACION</b> Al producirse una pérdida de gas se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.</p> <p><b>EFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION</b> La sustancia es corrosiva de los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La inhalación del gas puede originar edema pulmonar (véanse Notas). La sustancia puede causar efectos en la calcemia, induciendo hipocalcemia. La exposición por encima del OEL puede producir la muerte. Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata. Se recomienda vigilancia médica.</p> <p><b>EFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA</b> La sustancia puede causar fluorosis.</p>	
<b>PROPIEDADES FISICAS</b>	Punto de ebullición: 20°C Punto de fusión: -83°C Densidad relativa (agua = 1): 1.0 como líquido a 4°C	Solubilidad en agua: Elevada Presión de vapor, kPa a 25°C: 122 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 0.7	
<b>DATOS AMBIENTALES</b>			



<p>ACIDO FORMICO Acido metanoico Acido hidroxicarboxílico HCOOH/CH<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Masa molecular: 46</p> <p>Nº CAS 64-18-6 Nº RTECS LQ4900000 Nº ICSC 0485 Nº NU 1779 Nº CE 607-001-00-0 (&gt;90%)</p> 			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Combustible.	Evitar llama abierta.	Polvos, espuma resistente al alcohol, pulverización de agua, dióxido de carbono.
<b>EXPLOSION</b>	Por encima de 69°C: pueden formarse mezclas explosivas vapor/aire.	Por encima de 69°C: sistema cerrado, ventilación.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones por pulverización con agua.
<b>EXPOSICION</b>		¡EVITAR TODO CONTACTO!	
<b>• INHALACION</b>	Sensación de quemazón, tos, dolor de garganta, dificultad respiratoria, jadeo, pérdida de conocimiento, síntomas no inmediatos: (véanse Notas).	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semincorporado y someter a atención médica.
<b>• PIEL</b>	¡PUEDE ABSORBERSE! Dolor, ampollas, quemaduras cutáneas graves.	Guantes protectores, traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y solicitar atención médica.
<b>• OJOS</b>	Dolor, enrojecimiento, visión borrosa, quemaduras profundas graves.	Pantalla facial o protección ocular en combinación con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico.
<b>• INGESTION</b>	Dolor de garganta, sensación de quemazón, dolor abdominal, calambres abdominales, diarrea, vómitos.	No comer, beber ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca; NO provocar el vómito y someter a atención médica.
DERRAMAS Y FUGAS		ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes herméticos; neutralizar con precaución el líquido derramado con una disolución alcalina débil (p.ej: carbonato disódico). Eliminar a continuación con agua abundante. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).		Separado de alimentos y piensos; separado de oxidantes fuertes, bases y ácidos fuertes. Mantener en una habitación bien ventilada. Bien cerrado.	NO transportar con alimentos y piensos. símbolo C R: 35 S: (1/2-)23-26-45 Nota: B Clasificación de Peligros NU: 8 Grupo de Envasado NU: II CE:
<b>D A T O S I M P O R T A N T E S</b>	<p><b>ESTADO FISICO: ASPECTO</b> Líquido incoloro humeante, de olor acre.</p> <p><b>PELIGROS FISICOS</b></p> <p><b>PELIGROS QUIMICOS</b> La sustancia se descompone al calentarla intensamente y en contacto con ácidos fuertes (ácido sulfúrico), produciendo monóxido de carbono. La sustancia es moderadamente ácida. Reacciona violentamente con oxidantes; reacciona violentamente con bases fuertes, originando riesgo de incendio y explosión. Ataca muchos plásticos y metales.</p> <p><b>LIMITES DE EXPOSICION</b> TLV (como TWA): 5 ppm; 9.4 mg/m<sup>3</sup>; (como STEL): 10 ppm; 19 mg/m<sup>3</sup> (ACGIH 1986). LEP UE: (como TWA): 5 ppm; 9 mg/m<sup>3</sup> (UE 2006)</p>	<p><b>VIAS DE EXPOSICION</b> La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor, a través de la piel y por ingestión.</p> <p><b>RIESGO DE INHALACION</b> Por la evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.</p> <p><b>EFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION</b> La sustancia es muy corrosiva de los ojos, la piel y el tracto respiratorio. Corrosivo por ingestión. La inhalación del vapor puede originar edema pulmonar (véanse Notas). La sustancia puede causar efectos en el metabolismo energético, dando lugar a acidosis.</p>	
<b>PROPIEDADES FISICAS</b>	Punto de ebullición: 101°C Punto de fusión: 8°C Densidad relativa (agua = 1): 1.2 Solubilidad en agua: miscible Presión de vapor, kPa a 20°C: 4.6 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.6	Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.03 Punto de inflamación: 69°C Temperatura de autoignición: 520°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 18-51 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0.54	
<b>DATOS AMBIENTALES</b>	Esta sustancia es nociva para los organismos acuáticos.		

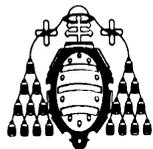


## 8.5.- MASA HÚMEDA Y SECA DE LAS PLANTAS COSECHADAS

Alveolo	Testigo		ED1		ED2		ED3	
	Masa húmeda	Masa seca						
1	2,1927	0,1341	2,0756	0,0908	7,9431	0,3973	4,9988	0,2276
2	3,9534	0,2057	6,6637	0,2990	8,4064	0,3986	6,3385	0,3720
3	3,7295	0,2470	-	-	7,4487	0,3605	5,5145	0,1993
4	3,5418	0,2436	9,2889	0,4266	6,8799	0,3000	3,7777	0,1832
5	1,9590	0,1220	8,9909	0,4317	-	-	2,5966	0,1147
6	4,3624	0,3083	-	-	5,1516	0,2674	-	-
7	-	-	1,3873	0,0638	5,6551	0,2335	9,5212	0,4710
8	3,5097	0,1859	6,9597	0,3613	8,3133	0,3778	2,6101	0,1206
9	2,9839	0,1642	6,8942	0,2958	9,5692	0,3400	7,2364	0,3388
10	2,4782	0,1507	7,3659	0,3246	10,2123	0,4367	3,9435	0,1706
11	3,0947	0,2004	4,4479	0,1788	4,4262	0,1905	7,9815	0,3287
12	2,1936	0,1449	8,9092	0,4724	8,5355	0,4027	-	-
13	3,5648	0,1915	2,8756	0,1636	3,7387	0,1522	0,6063	0,0272
14	2,8373	0,1486	5,0393	0,2301	5,6786	0,2183	1,2840	0,0493
15	-	-	3,4052	0,1481	4,2601	0,2143	3,9907	0,1553
16	2,9731	0,1611	2,3798	0,0953	1,9509	0,0862	3,4382	0,1485
17	1,2734	0,0734	6,9654	0,3003	7,5394	0,3452	-	-
18	2,2319	0,1395	4,7787	0,2202	6,2549	0,2991	5,473	0,2786
19	2,7584	0,1530	3,5516	0,1820	5,1595	0,2274	7,0251	0,3483
20	1,9235	0,0863	5,9666	0,3195	3,9552	0,2007	1,2711	0,0531
21	3,3143	0,1859	4,0149	0,1952	6,3832	0,2806	9,4708	0,4100
22	3,6715	0,2118	5,3596	0,2595	8,0892	0,3570	6,6507	0,2741
23	3,3749	0,2037	9,6849	0,4603	8,4933	0,3988	4,6975	0,2054
24	3,5377	0,2837	2,5866	0,1242	8,0696	0,3666	4,8084	0,1997

NOTA: Las casillas marcadas con un guión simple (-) se refieren a que en ese alveolo no se ha recogido muestra de planta.

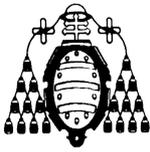
Tabla 8.29 - Masa cosechada (g) del testigo y de las dosis de estruvida.



Alveolo	M1 t0		M2 t0		M3 t0		M1 t1		M2 t1		M3 t1	
	Masa húmeda	Masa seca										
1	7,9565	0,4874	5,5541	0,3676	4,1750	0,2062	4,9317	0,4535	4,9147	0,0989	-	-
2	1,3191	0,0527	5,2073	0,2681	0,3077	0,0126	4,6221	0,2110	4,2032	0,4767	-	-
3	5,8507	0,2427	5,4774	0,3533	-	-	5,8813	0,2743	-	-	-	-
4	8,5720	0,4148	5,5861	0,2538	-	-	7,0036	0,1895	4,3514	0,3021	-	-
5	2,9468	0,1426	3,1572	0,1219	7,2389	0,3367	6,0207	0,2690	4,3854	0,3020	-	-
6	8,8891	0,4154	5,7568	0,3730	7,1313	0,3173	4,7681	0,2339	-	-	-	-
7	5,4916	0,2512	-	-	4,6151	0,1875	6,4339	0,3014	7,4888	0,4563	10,3624	0,6217
8	3,7797	0,159	4,4942	0,2444	9,8267	0,4802	2,6636	0,1424	6,3767	0,3823	7,9894	0,3930
9	-	-	4,8402	0,2171	-	-	2,6221	0,1137	4,3570	0,2166	-	-
10	7,9652	0,3887	5,2195	0,2159	2,7870	0,1114	-	-	-	-	4,6066	0,2743
11	3,2108	0,1356	5,4553	0,2992	1,1984	0,0474	4,9863	0,2001	2,3447	0,1560	-	-
12	1,6958	0,0691	4,5820	0,2140	-	-	9,0230	0,5042	8,9700	0,5512	-	-
13	-	-	5,5712	0,3018	6,8816	0,3186	4,7792	0,2349	7,7067	0,1833	8,7446	0,4654
14	5,8709	0,2451	8,3334	0,4977	2,3040	0,0943	-	-	8,6267	0,5073	1,8274	0,0887
15	5,1588	0,2419	1,5543	0,1080	6,4637	0,2513	-	-	4,9610	0,2399	-	-
16	0,6332	0,0253	4,7926	0,2140	3,7282	0,1445	7,9613	0,3503	8,2542	0,4400	-	-
17	-	-	7,9426	0,3477	3,5338	0,1301	5,0607	0,2257	8,7434	0,4371	1,7589	0,0825
18	2,2454	0,0883	1,1993	0,0461	6,5003	0,3208	8,8053	0,4677	-	-	-	-
19	4,7388	0,2362	5,4607	0,2796	4,5919	0,2091	9,0454	0,4142	0,9546	0,0396	10,4069	0,6767
20	2,1499	0,0912	2,9771	0,1101	6,0035	0,3151	7,0049	0,2933	9,4889	0,5596	4,3713	0,1821
21	5,7975	0,2400	6,6416	0,3512	5,0782	0,1982	-	-	8,4391	0,5152	3,3967	0,1776
22	2,4994	0,1152	3,9707	0,1984	6,6043	0,3068	-	-	-	-	-	-
23	7,5831	0,3341	5,8566	0,2731	6,2403	0,3100	6,9266	0,3202	8,2878	0,5153	4,6066	0,2743
24	-	-	3,9707	0,1984	-	-	3,9473	0,1788	-	-	-	-

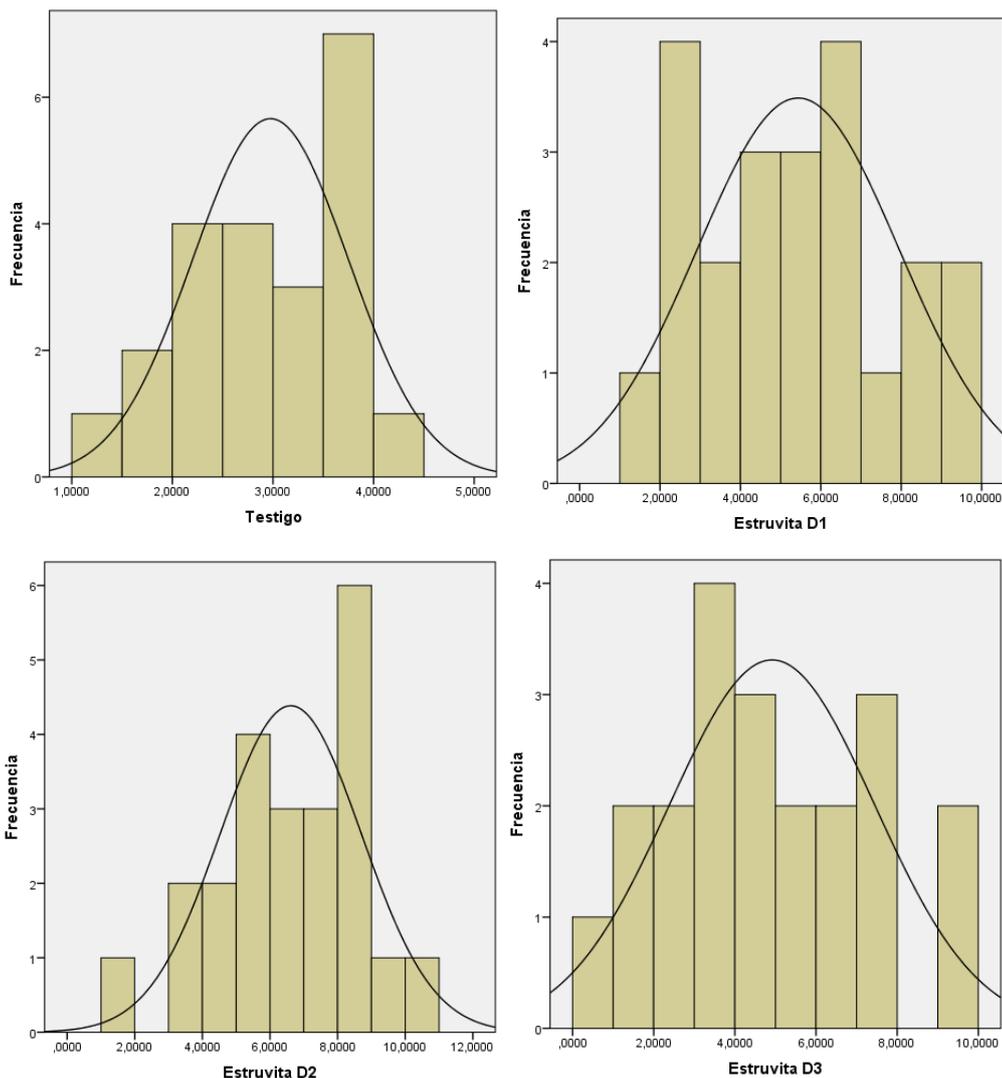
NOTA: Las casillas marcadas con un guión simple (-) se refieren a que en ese alveolo no se ha recogido muestra de planta.

Tabla 8.30 - Masa cosechada (g) de las mezclas probadas a diferentes tiempos de siembra.



### 8.6.- HISTOGRAMAS DE FRECUENCIAS

En este apéndice se recogen los histogramas de frecuencias obtenidos con el programa estadístico IBM SPSS, los cuales permiten una comprobación visual de la existencia o no de normalidad en el conjunto de valores analizados. Los histogramas son representaciones gráficas por medio de barras verticales, de una distribución de frecuencias de una variable continua. Cada una de las barras refleja un intervalo o clase y la altura de las mismas es proporcional a la frecuencia (número de veces) con que aparecen los valores en cada uno de los intervalos, en el caso concreto que nos ocupa, se representa la frecuencia con la que se repiten los datos de partida, masa húmeda recogida de cada alveolo. Cabe indicar que además se muestra la curva normal (campana de Gauss) para comprobar si el gráfico representado se ajusta en cierta medida, a esta curva.



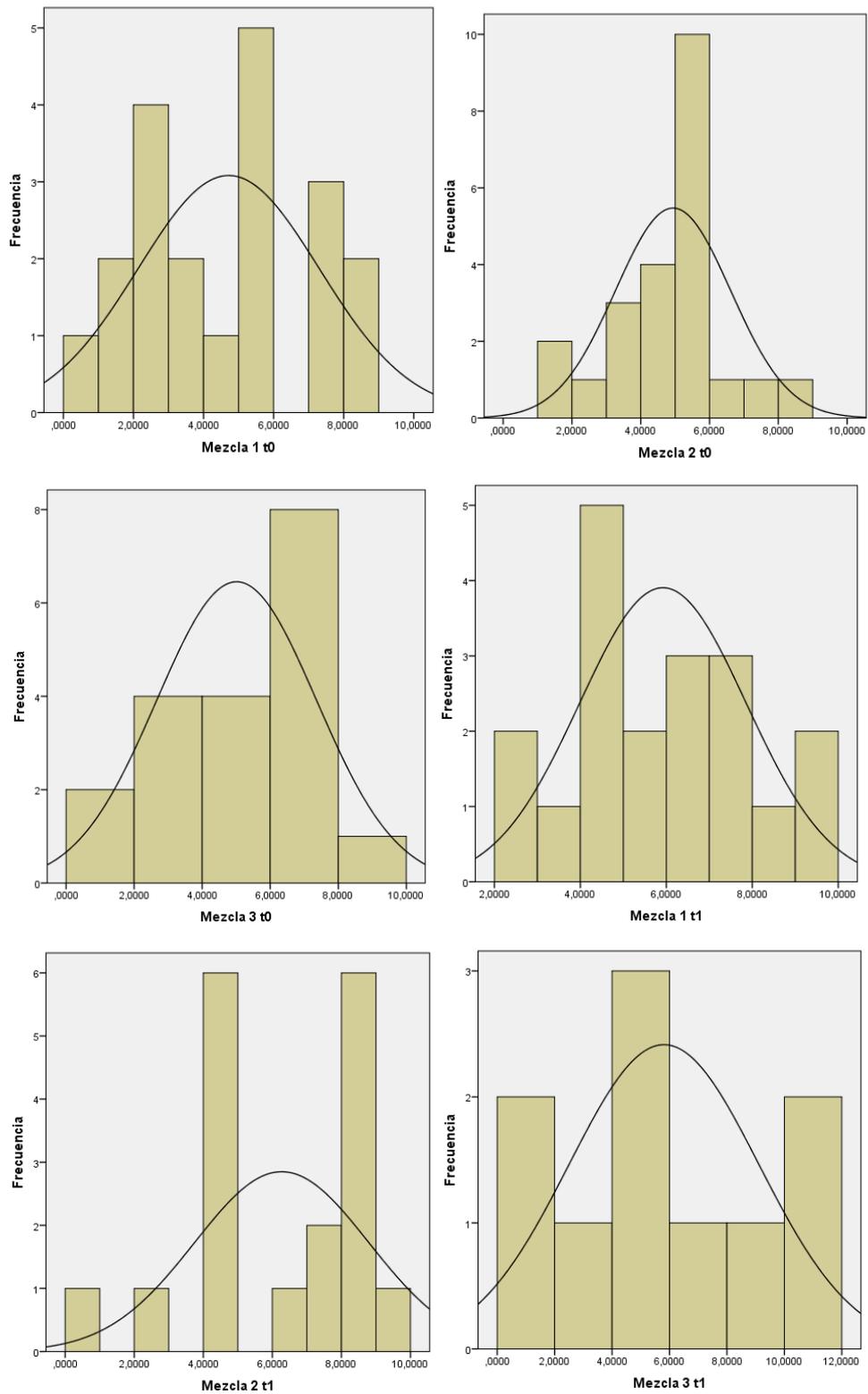
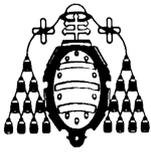
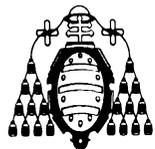


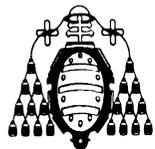
Figura 8.25 - Histogramas de frecuencias de los ensayos correspondientes al testigo, estruvita y mezcla.

**8.7.- MEDIA ARITMÉTICA DEL CONTENIDO EN METALES DE LOS CULTIVOS: T, ED2 y M2t0**

Alveolo	TESTIGO					
	Cd	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni
1	0,0414	0,1610	0,5400	-	-	0,2468
2	0,0287	0,1000	0,3804	-	-	0,1132
3	0,0346	0,1270	0,4739	-	-	0,1855
4	0,0348	0,1480	0,5088	-	-	0,1424
5	0,0300	0,0790	0,3136	-	-	0,0930
6	0,0318	0,0910	0,3420	-	-	0,1785
7						
8	0,0369	0,1230	0,4580	-	-	0,1184
9	0,0284	0,1070	0,4221	-	-	0,1274
10	0,0339	0,0880	0,2744	-	-	0,1388
11	0,0354	0,1000	0,3136	-	-	0,1077
12	0,0318	0,0890	0,2986	-	-	0,1176
13	0,0381	0,1480	0,5014	-	-	0,1831
14	0,0328	0,0990	0,3362	-	-	0,0948
15						
16	0,0410	0,1210	0,3607	-	-	0,1147
17	0,0191	0,0370	0,1212	-	-	0,0758
18	0,0365	0,1370	0,3743	-	0,0363	0,1242
19	0,0374	0,1460	0,4581	-	-	0,1500
20	0,0307	0,0910	0,2435	-	-	0,1014
21	0,0342	0,1000	0,3106	-	-	0,1380
22	0,0421	0,1220	0,3976	-	0,1318	0,1422
23	0,0389	0,1250	0,3149	-	-	0,1441
24	0,0377	0,1030	0,3056	-	0,0345	0,1274

- Las casillas marcadas con un guión simple (-) se refieren a que el contenido del metal correspondiente, en esa muestra, se encuentra por debajo del límite de detección del equipo.
- Las casillas en blanco hacen referencia a que en ese alveolo no se recogió muestra de planta.

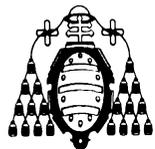
Tabla 8.31 - Media aritmética (mg metal / L muestra) del contenido en metales del testigo.



Alveolo	ED2					
	Cd	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni
1	0,0271	0,1800	0,4012	-	0,0434	0,1884
2	0,0306	0,1090	0,6192	-	0,0618	0,1486
3	0,0254	0,1730	0,6148	-	0,0390	0,1463
4	0,0413	0,1530	0,5753	-	0,1270	0,1789
5						
6	0,0302	0,1050	0,3719	-	0,0276	0,1415
7	0,0329	0,1150	0,3642	-	0,0683	0,1448
8	0,0280	0,1460	0,5051	-	0,0866	0,1494
9	0,0410	0,1890	0,7047	0,0040	0,1397	0,1703
10	0,0396	0,2200	0,7850	-	0,2089	0,1836
11	0,0331	0,0890	0,2894	-	-	0,1208
12	0,0385	0,1520	0,5705	0,0020	0,1275	0,1746
13	0,0329	0,0690	0,2559	-	-	0,1163
14	0,0329	0,1050	0,3153	-	0,1277	0,1355
15	0,0288	0,0850	0,2950	-	0,0196	0,1497
16	0,0299	0,0410	0,1423	-	0,0827	0,0961
17	0,0391	0,1530	0,5397	0,0060	0,1542	0,1744
18	0,0349	0,1320	0,4593	-	0,1329	0,1608
19	0,0314	0,1030	0,3652	-	0,1346	0,1397
20	0,0324	0,0640	0,2549	-	0,0844	0,1564
21	0,0419	0,1380	0,5158	-	0,1448	0,1555
22	0,0390	0,1450	0,5523	-	0,1985	0,1690
23	0,0449	0,1650	0,7005	0,0020	0,2020	0,1992
24	0,0491	0,1560	0,6213	-	0,2479	0,1797

M2t0					
Cd	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni
0,0234	0,1790	0,5755	0,0140	0,2301	0,1930
0,0283	0,1090	0,3829	-	0,2148	0,1480
0,0245	0,1490	0,4913	0,0170	0,0944	0,1763
0,0213	0,1480	0,3857	-	0,2014	0,1638
0,0200	0,0630	0,1636	-	0,1773	0,1536
0,0404	0,1690	0,4749	0,0260	0,2269	0,1942
0,0306	0,1320	0,4091	0,0210	0,1833	0,1741
0,0273	0,1170	0,3369	0,0000	0,1725	0,1887
0,0313	0,1800	0,4198	0,0280	0,2740	0,1937
0,0192	0,1220	0,4314	0,0060	0,2442	0,1569
0,0245	0,1180	0,3088	0,0160	0,1934	0,2047
0,0289	0,1220	0,4364	0,0000	0,2100	0,1795
0,0398	0,2580	0,8306	0,0730	0,3162	0,2603
0,0311	0,1350	0,4044	0,0510	0,2073	0,2011
0,0254	0,1150	0,3558	0,0080	0,2764	0,1729
0,0403	0,1850	0,5639	0,0190	0,2559	0,1866
0,0231	0,0280	0,0779	-	0,2030	0,1349
0,0350	0,1170	0,3840	0,0080	0,2493	0,1803
0,0200	0,0580	0,1732	-	0,2417	0,1491
0,0374	0,1640	0,5477	0,0310	0,2759	0,1905
0,0332	0,0770	0,3009	0,0070	0,3104	0,1801
0,0384	0,1460	0,4583	0,0230	0,2500	0,2282
0,0332	0,0770	0,3009	0,0070	0,3104	0,1801

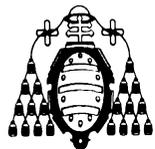
Tabla 8.32 - Media aritmética (mg metal / L muestra) del contenido en metales de ED2 y M2t0.

**8.8.- CONTENIDO EN METALES DE LOS CULTIVOS: T, ED2 y M2t0**

Alveolo	TESTIGO					
	Cd	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni
1	0,3773	1,4685	4,9250	-	-	2,2514
2	0,1450	0,5059	1,9242	-	-	0,5728
3	0,1854	0,6811	2,5411	-	-	0,9950
4	0,1963	0,8357	2,8728	-	-	0,8043
5	0,3059	0,8065	3,2011	-	-	0,9498
6	0,1456	0,4172	1,5677	-	-	0,8185
7						
8	0,2101	0,7009	2,6096	-	-	0,6749
9	0,1901	0,7172	2,8288	-	-	0,8541
10	0,2733	0,7102	2,2141	-	-	1,1204
11	0,2286	0,6463	2,0264	-	-	0,6962
12	0,2896	0,8115	2,7220	-	-	1,0725
13	0,2136	0,8303	2,8128	-	-	1,0275
14	0,2310	0,6978	2,3695	-	-	0,6685
15						
16	0,2756	0,8140	2,4261	-	-	0,7718
17	0,2995	0,5811	1,9028	-	-	1,1910
18	0,3268	1,2277	3,3536	-	0,3250	1,1133
19	0,2709	1,0586	3,3211	-	-	1,0878
20	0,3189	0,9462	2,5313	-	-	1,0547
21	0,2062	0,6034	1,8740	-	-	0,8330
22	0,2292	0,6646	2,1656	-	0,7178	0,7748
23	0,2303	0,7408	1,8658	-	-	0,8541
24	0,2129	0,5823	1,7274	-	0,1949	0,7204

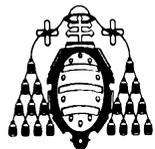
- Las casillas marcadas con un guión simple (-) se refieren a que el contenido del metal correspondiente, en esa muestra, se encuentra por debajo del límite de detección del equipo.
- Las casillas en blanco hacen referencia a que en ese alveolo no se recogió muestra de planta.

Tabla 8.33 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra bruta) del testigo.



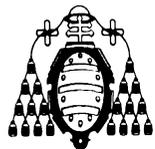
Alveolo	ED2						M2t0					
	Cd	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni	Cd	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni
1	0,0682	0,4532	1,0101	-	0,1092	0,4745	0,0841	0,6446	2,0722	0,0504	0,8285	0,6951
2	0,0727	0,2593	1,4730	-	0,1470	0,3536	0,1086	0,4186	1,4704	-	0,8249	0,5686
3	0,0681	0,4645	1,6506	-	0,1046	0,3929	0,0893	0,5441	1,7937	0,0621	0,3446	0,6439
4	0,1200	0,4448	1,6723	-	0,3691	0,5202	0,0761	0,5299	1,3807	-	0,7210	0,5866
5							0,1265	0,3991	1,0360	-	1,1230	0,9732
6	0,1171	0,4076	1,4436	-	0,1070	0,5495	0,1402	0,5871	1,6497	0,0903	0,7882	0,6748
7	0,1162	0,4067	1,2879	-	0,2415	0,5122						
8	0,0673	0,3512	1,2150	-	0,2083	0,3595	0,1360	0,5874	1,8203	0,0935	0,8156	0,7749
9	0,0856	0,3950	1,4727	0,0084	0,2919	0,3560	0,1127	0,4835	1,3919	-	0,7127	0,7799
10	0,0775	0,4309	1,5373	-	0,4091	0,3596	0,1198	0,6897	1,6084	0,1073	1,0498	0,7423
11	0,1494	0,4022	1,3074	-	-	0,5460	0,0703	0,4473	1,5814	0,0220	0,8952	0,5753
12	0,0901	0,3562	1,3367	0,0047	0,2987	0,4092	0,1068	0,5151	1,3477	0,0698	0,8440	0,8936
13	0,1758	0,3691	1,3687	-	-	0,6223	0,1036	0,4380	1,5664	-	0,7538	0,6445
14	0,1158	0,3698	1,1103	-	0,4497	0,4773	0,0954	0,6192	1,9933	0,1752	0,7588	0,6248
15	0,1351	0,3991	1,3847	-	0,0919	0,7030	0,3998	1,7371	2,8012	0,6562	2,6671	2,5881
16	0,3062	0,4203	1,4583	-	0,8475	0,9855	0,1059	0,4799	1,4846	0,0334	1,1533	0,7217
17	0,1036	0,4059	1,4315	0,0159	0,4090	0,4627	0,1014	0,4658	1,4198	0,0478	0,6443	0,4700
18	0,1115	0,4221	1,4684	-	0,4249	0,5143	0,3847	0,4669	1,2983	-	3,3848	2,2502
19	0,1216	0,3993	1,4154	-	0,5216	0,5417	0,1281	0,4285	1,4062	0,0293	0,9130	0,6605
20	0,1637	0,3236	1,2887	-	0,4266	0,7910	0,1341	0,3896	1,1632	-	1,6235	1,0019
21	0,1312	0,4324	1,6160	-	0,4536	0,4873	0,1125	0,4939	1,6492	0,0934	0,8307	0,5738
22	0,0963	0,3585	1,3654	-	0,4907	0,4179	0,1671	0,3878	1,5153	0,0353	1,5633	0,9073
23	0,1057	0,3885	1,6494	0,0047	0,4756	0,4692	0,1310	0,4986	1,5649	0,0785	0,8536	0,7794
24	0,1216	0,3866	1,5397	-	0,6143	0,4455	0,1671	0,3878	1,5153	0,0353	1,5633	0,9073

Tabla 8.34 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra bruta) de ED2 y M2t0.



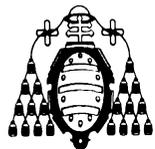
Alveolo	TESTIGO					
	Cd	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni
1	6,17	24,01	80,53	-	-	36,81
2	2,79	9,72	36,98	-	-	11,01
3	2,80	10,28	38,37	-	-	15,02
4	2,85	12,15	41,77	-	-	11,69
5	4,91	12,95	51,40	-	-	15,25
6	2,06	5,90	22,18	-	-	11,58
7						
8	3,97	13,23	49,27	-	-	12,74
9	3,46	13,03	51,41	-	-	15,52
10	4,49	11,68	36,41	-	-	18,43
11	3,53	9,98	31,29	-	-	10,75
12	4,38	12,28	41,21	-	-	16,24
13	3,98	15,46	52,36	-	-	19,13
14	4,41	13,32	45,24	-	-	12,76
15						
16	5,09	15,02	44,77	-	-	14,24
17	5,20	10,08	33,01	-	-	20,66
18	5,23	19,64	53,66	-	5,20	17,81
19	4,88	19,08	59,88	-	-	19,61
20	7,11	21,09	56,42	-	-	23,51
21	3,68	10,76	33,41	-	-	14,85
22	3,97	11,52	37,54	-	12,44	13,43
23	3,82	12,27	30,91	-	-	14,15
24	2,66	7,26	21,54	-	2,43	8,98

Tabla 8.35 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra seca) del testigo.



Alveolo	ED2						M2t0					
	Cd	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni	Cd	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni
1	1,36	9,06	20,19	-	2,18	9,49	1,27	9,74	31,31	0,76	12,52	10,50
2	1,53	5,47	31,07	-	3,10	7,46	2,11	8,13	28,56	-	16,02	11,04
3	1,41	9,60	34,11	-	2,16	8,12	1,39	8,43	27,81	0,96	5,34	9,98
4	2,75	10,20	38,35	-	8,46	11,93	1,68	11,66	30,39	-	15,87	12,91
5							3,28	10,34	26,83	-	29,08	25,21
6	2,26	7,85	27,81	-	2,06	10,59	2,16	9,06	25,46	1,39	12,16	10,41
7	2,82	9,85	31,19	-	5,85	12,41						
8	1,48	7,73	26,74	-	4,58	7,91	2,50	10,80	33,47	1,72	15,00	14,25
9	2,41	11,12	41,45	0,24	8,22	10,02	2,51	10,78	31,03	-	15,89	17,39
10	1,81	10,08	35,95	-	9,57	8,41	2,90	16,67	38,88	2,59	25,38	17,95
11	3,47	9,34	30,38	-	-	12,69	1,28	8,16	28,83	0,40	16,32	10,49
12	1,91	7,55	28,33	0,10	6,33	8,67	2,29	11,03	28,86	1,50	18,07	19,13
13	4,32	9,07	33,62	-	-	15,29	1,91	8,08	28,92	-	13,91	11,90
14	3,01	9,62	28,88	-	11,70	12,42	1,60	10,37	33,38	2,93	12,71	10,46
15	2,68	7,93	27,53	-	1,83	13,97	5,75	25,00	74,88	9,44	38,38	37,25
16	6,93	9,51	33,00	-	19,18	22,30	2,37	10,75	33,25	0,75	25,83	16,16
17	2,26	8,86	31,27	0,35	8,93	10,11	2,32	10,64	32,43	1,09	14,72	10,74
18	2,33	8,83	30,71	-	8,88	10,75	10,01	12,15	33,77	-	88,06	58,54
19	2,76	9,06	32,12	-	11,84	12,29	2,50	8,37	27,46	0,57	17,83	12,90
20	3,23	6,38	25,40	-	8,41	15,59	3,63	10,54	31,45	-	43,90	27,09
21	2,98	9,84	36,76	-	10,32	11,09	2,13	9,34	31,19	1,77	15,71	10,85
22	2,18	8,12	30,94	-	11,12	9,47	3,34	7,76	30,33	0,71	31,29	18,16
23	2,25	8,27	35,13	0,10	10,13	9,99	2,81	10,69	33,56	1,68	18,31	16,71
24	2,68	8,51	33,89	-	13,52	9,81	3,34	7,76	30,33	0,71	31,29	18,16

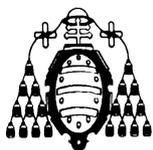
Tabla 8.36 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra seca) de ED2 y M2t0.

**8.9.- CONTENIDO EN METALES DEL CULTIVO DIGESTATO D1t2**

Alveolo	Digestato D1t2					
	Cd	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni
1	0,2836	0,3650	1,7339	-	2,8364	2,0317
2						
3						
4						
5	0,1645	0,3531	1,4402	-	1,4769	1,3009
6	0,1512	0,4082	2,3765	-	3,0296	4,4768
7	0,1845	0,2787	1,3413	-	1,0115	1,5825
8	0,4067	0,5004	2,3704	-	3,3808	3,6304
9	0,2380	0,4133	1,7613	-	2,8483	1,9129
10	0,3451	0,7046	2,2774	-	4,3363	4,2710
11	0,2503	0,3838	1,4850	-	2,3356	2,3705
12						
13						
14						
15	0,1818	0,4167	1,5325	-	1,6195	1,7755
16						
17						
18	0,2824	0,3366	1,4575	-	1,8591	2,2975
19	0,2433	0,4624	1,5762	-	2,6487	2,1244
20	0,1801	0,4115	1,3402	-	2,7203	1,7720
21	0,1549	0,3701	1,4235	-	1,8663	1,3968
22	0,2275	0,4189	1,7368	-	2,6780	2,2746
23	0,1839	0,4809	1,4280	-	1,9737	1,6769
24	0,2234	0,6006	1,7896	-	2,2692	2,0287

Tabla 8.37 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra bruta) de digestato D1t2.

- Las casillas marcadas con un guión simple (-) se refieren a que el contenido del metal correspondiente, en esa muestra, se encuentra por debajo del límite de detección del equipo.
- Las casillas en blanco hacen referencia a que en ese alveolo no se recogió muestra de planta.

**8.10.- CONTENIDO EN METALES DE LOS ENSAYOS DE TIERRA**

TIERRA SIN ABONAR							
Número de réplicas	Masa de tierra (g)	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	0,3221	0,0177	0,5855	0,6605	0,7209	0,756	1,6115
2	0,3001	0,0219	0,6545	0,5855	0,6044	0,7243	1,5630
3	0,3033	0,0260	0,6305	0,5535	0,5924	0,5895	1,4616
4	0,3123	0,0188	0,8275	0,6225	0,7353	0,9352	1,9932
5	0,2866	0,0385	0,8265	0,6745	0,8185	0,9586	1,9792

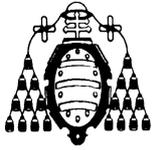
Tabla 8.38 - Media aritmética (mg metal / L muestra) del contenido en metales de la tierra sin abonar.

TIERRA SIN ABONAR						
Número de réplicas	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	1,37	45,44	51,27	55,95	58,68	125,08
2	1,82	54,52	48,78	50,35	60,34	130,21
3	2,14	51,97	45,62	48,83	48,59	120,47
4	1,50	66,24	49,83	58,86	74,86	159,56
5	3,36	72,10	58,84	71,40	83,62	172,64
PROMEDIO	2,04	58,06	50,87	57,08	65,22	141,59

Tabla 8.39 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra seca) de la tierra sin abonar.

TIERRA FINAL DEL CULTIVO ED2							
Número de réplicas	Masa de tierra (g)	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	0,3332	0,0128	0,5723	0,5727	0,5310	0,3554	1,5988
2	0,3149	0,0224	0,4843	0,5167	0,4951	0,4904	1,6678
3	0,3025	0,0278	0,6283	0,4807	0,5483	0,6542	1,6810
4	0,2942	0,0258	0,5043	0,5037	0,5040	0,5038	1,7123
5	0,2908	0,0204	0,5013	0,5087	0,4990	0,4696	1,5948

Tabla 8.40 - Media aritmética (mg metal / L muestra) del contenido en metales de la tierra final del cultivo de ED2.



TIERRA FINAL DEL CULTIVO ED2						
Número de réplicas	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	0,96	42,94	42,97	39,84	26,67	119,96
2	1,78	38,45	41,02	39,30	38,93	132,40
3	2,29	51,93	39,72	45,31	54,07	138,92
4	2,19	42,86	42,80	42,83	42,81	145,50
5	1,75	43,10	43,73	42,90	40,37	137,10
PROMEDIO	1,79	43,86	42,05	42,03	40,57	134,78

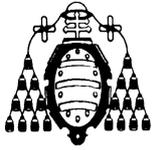
Tabla 8.41 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra seca) de la tierra final del cultivo de ED2.

TIERRA FINAL DEL CULTIVO M2t0							
Número de réplicas	Masa de tierra (g)	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	0,3003	0,0231	0,5403	0,5177	0,5499	0,5555	1,6391
2	0,2833	0,0251	0,4923	0,5167	0,5257	0,7639	1,6179
3	0,2942	0,0253	0,5253	0,5237	0,5780	0,6012	1,6142
4	0,3076	0,0254	0,5573	0,5497	0,5984	0,5758	1,5909
5	0,3271	0,0220	0,5463	0,5477	0,5606	0,7132	1,6763

Tabla 8.42 - Media aritmética (mg metal / L muestra) del contenido en metales de la tierra final del cultivo de M2t0.

TIERRA FINAL DEL CULTIVO M2t0						
Número de réplicas	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	1,92	44,98	43,10	45,78	46,25	136,45
2	2,21	43,45	45,59	46,39	67,41	142,77
3	2,15	44,64	44,50	49,11	51,09	137,17
4	2,06	45,30	44,67	48,63	46,80	129,30
5	1,68	41,76	41,86	42,84	54,51	128,12
PROMEDIO	2,00	44,02	43,94	46,55	53,21	134,76

Tabla 8.43 - Contenido en metales (mg metal / kg muestra seca) de la tierra final del cultivo de ED2.



### 8.11.- CROMATOGRAMAS DE LOS ENSAYOS: ED2 y M2T0

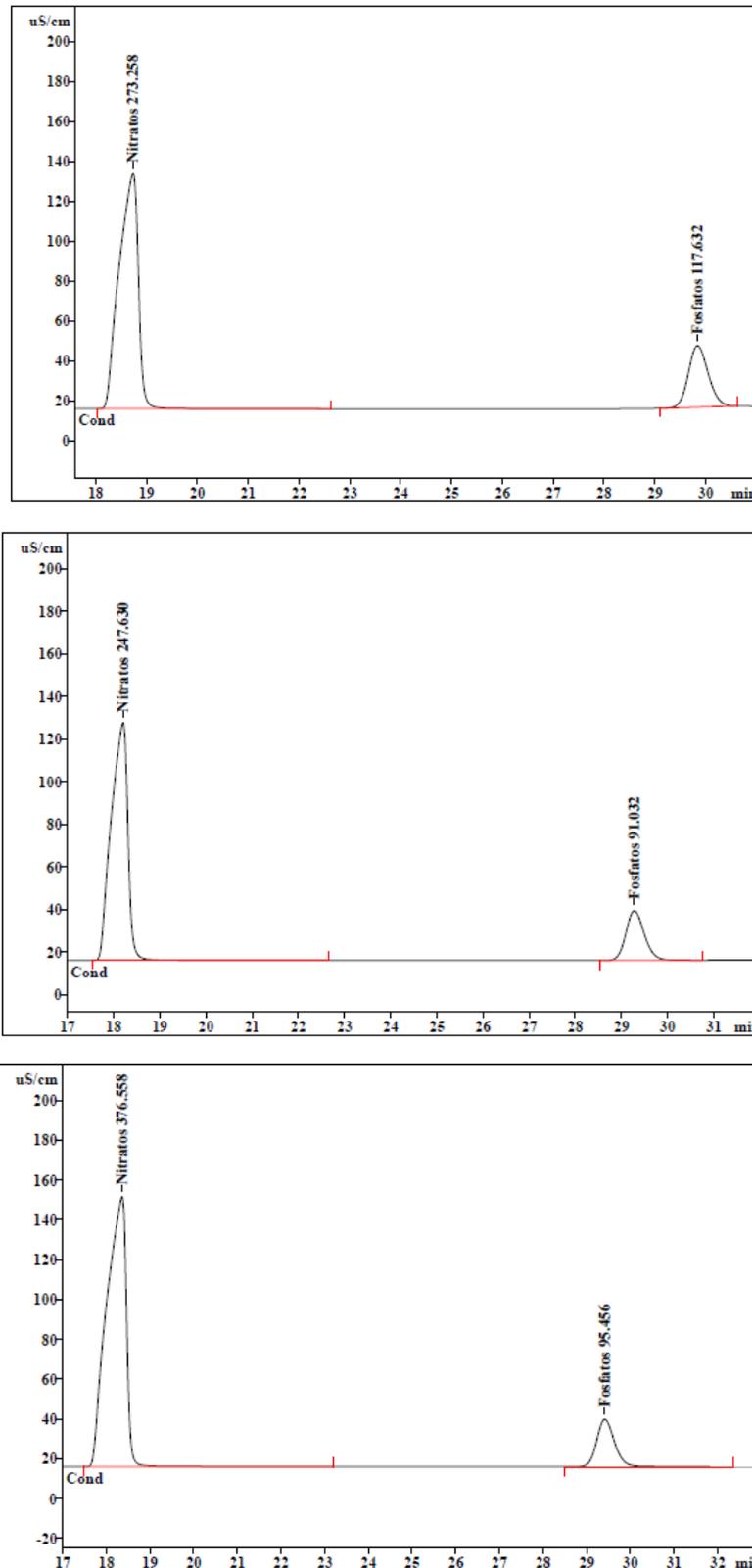


Figura 8.26 - Cromatogramas: Réplicas 1, 2 y 3, respectivamente, del ensayo ED2.

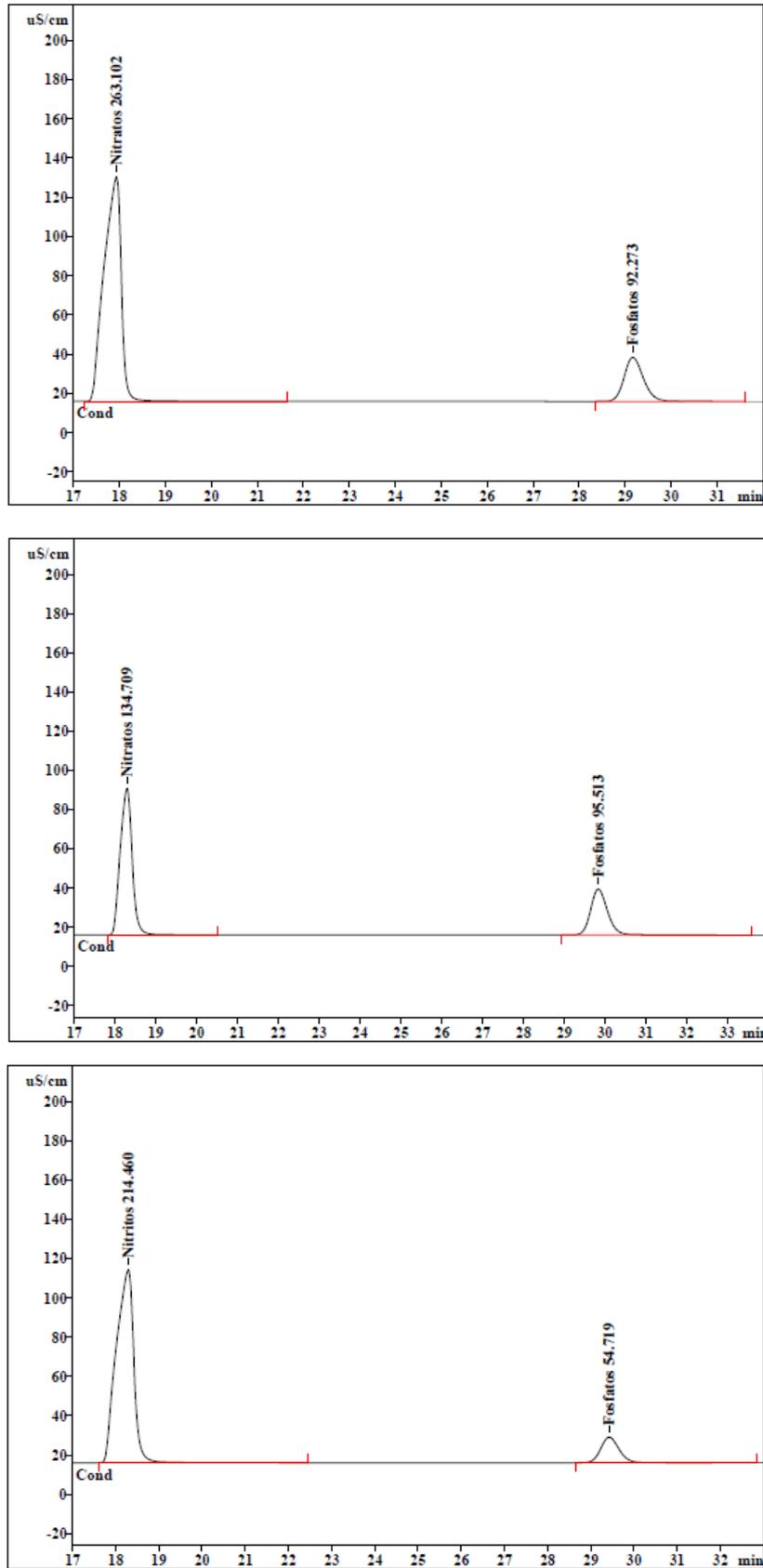
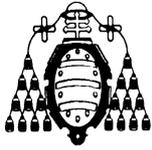


Figura 8.27 - Cromatogramas: Réplicas 1, 2 y 3, respectivamente, del ensayo M2t0.