

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y DEL MEDIO NATURAL**  
Master Universitario en Ingeniería Agronómica



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

## Un modelo de negocio para la recuperación de estruvita a partir de purines de cerdo

Curso 2019-2020

Autora: Carla García Ibáñez

Tutor: Salvador Calvet Sanz

València, junio de 2020

# Un modelo de negocio para la recuperación de estruvita a partir de purines de cerdo

## ABSTRACT

The concentration of pig farms in some territories can induce soil and water pollution derived from the surplus of nutrients. A classic way out is the agronomic recovery of manure as a fertilizer. This process is complex due to the livestock concentration in some areas that makes its agricultural application difficult due to the costs of handling and transporting the slurry.

The main objective of this study is to formulate a business model for the production of struvite from the treatment of small-scale livestock manure.

The research of the potential market and target customers included the development of an empathy map that considers what potential clients of the P recovery process can see, think, hear and do, including farmers with some capacity for innovation and environmental concern. Strategic formulation models (Design Thinking and Lean Canvas Model) were applied to the feasibility study of the reutilization of pig slurry and other organic influents for struvite crystallization.

The study was carried out within the framework of the international project Interreg RE-LIVE WASTE, aimed at following a circular approach to the valorization of livestock waste, in European Mediterranean countries.

The pilot experience consists of a treatment plant capable of processing 40 m<sup>3</sup> of liquid slurry per day for the production of the struvite precipitate. For this, a technology is proposed that largely reuses and improves previous installations, and adapts to the needs of small users. Net treatment costs are estimated to be between € 0.1 / m<sup>3</sup> in the most favorable scenario and € 5.7 / m<sup>3</sup> in the most unfavorable scenario.

The formulation of the business model takes into account the complexity of the problem and the necessary collaboration of the agents involved. The model was supported by an interdisciplinary group in which an agricultural professional organization, a livestock cooperative, a research center, an environmental foundation and a technological partner.

The study has an informative and pedagogical interest in that it illustrates how a pilot plant can be designed, improving another pre-existing treatment plant with a limited investment cost. The first tests have validated the effectiveness of the process and raised some questions about its commercial viability, taking into account regulatory issues and the need for more tests. The dissemination of the project contributes to raising awareness of the opportunities offered by a circular approach in areas of high livestock density and excess nutrients.

Keywords: struvite precipitation, P recovery, pig slurry, circular economy, animal waste treatment.

València, may 2020

Author: Carla García Ibáñez

Supervisor: Salvador Calvet Sanz

## RESUMEN

La concentración de granjas porcinas en algunos territorios puede inducir a contaminación del suelo y agua derivados del excedente de nutrientes. Una salida clásica es la valorización agronómica de los purines como fertilizante. Dicha valorización es compleja por la concentración de la cabaña ganadera en algunas zonas que hace difícil su aplicación agrícola en áreas próximas y por los costes de manejo y transporte de los purines.

El objetivo principal de este TFM es formular un modelo de negocio para la producción de estruvita a partir del tratamiento de deyecciones ganaderas a pequeña escala.

La investigación del mercado potencial y clientes objetivo incluyó la elaboración de un mapa de empatía que incluye lo que pueden ver, pensar, oír y hacer los clientes potenciales del proceso de recuperación de P, incluyendo entre ellos a agricultores y ganaderos con cierta capacidad de innovación y sensibilidad ambiental. Se aplicaron modelos de formulación estratégica (Design Thinking y Modelo Lean Canvas) al estudio de viabilidad de la reutilización de purines de cerdo y otros influentes orgánicos para la cristalización de estruvita.

El estudio se sitúa en el marco del proyecto internacional Interreg RE-LIVE WASTE, orientado a un enfoque circular de valorización de residuos ganaderos, en países del Mediterráneo europeo.

La experiencia piloto consiste en una planta de tratamiento capaz de procesar 40 m<sup>3</sup> de purín líquido al día para la producción del precipitado. Para ello se propone una tecnología que en gran medida reutiliza y mejora instalaciones previas, y se adapta a las necesidades de granjas de reducida dimensión. Se calcula que los costes netos de tratamiento se situarían entre 0,1 €/m<sup>3</sup> en el escenario más favorable y 5,7 €/m<sup>3</sup> en el más desfavorable.

La formulación del modelo de negocio tiene en cuenta la complejidad del problema y la necesaria colaboración de agentes implicados. Se contó con la colaboración de un grupo interdisciplinar en el que participaron una organización profesional agraria, una cooperativa ganadera, un centro de investigación, una fundación ambientalista y un socio tecnológico.

El estudio tiene un interés divulgativo y pedagógico en cuanto ilustra cómo se puede diseñar una planta piloto, mejorando otra planta de tratamiento preexistente con un coste de inversión limitado. Las primeras pruebas han permitido validar la eficacia del proceso y plantear algunos interrogantes, sobre su viabilidad comercial teniendo en cuenta cuestiones normativas y la necesidad de realizar más ensayos. Con la divulgación del proyecto se contribuye a crear conciencia sobre las oportunidades que ofrece un enfoque circular en zonas de alta densidad ganadero y exceso de nutrientes.

Palabras clave: precipitación de estruvita, recuperación de fósforo, purín de cerdo, economía circular, tratamiento de residuos ganaderos.

València, mayo de 2020

Autora: Carla García Ibáñez

Tutor: Salvador Calvet Sanz

*"La UE tiene la capacidad colectiva de transformar su economía y su sociedad para situarlas en una senda más sostenible.....El Pacto Verde Europeo acelerará y apuntalará la transición necesaria en todos los sectores"*

(Comunicación de la Comisión Europea sobre El Pacto Verde Europeo de diciembre de 2019)

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo no habría sido posible sin la posibilidad de haber colaborado en el proyecto XXX Re-Live Waste financiado por el programa Interreg de la Unión Europea.

Me ayudó mucho compartir expectativas y experiencias con personas expertas en ganadería y el enfoque circular de los residuos. En particular, agradezco el apoyo de Francis Ferreres (Asociación Ganaderos de Castellón), Salvador Martínez (técnico agrario), Jordi Domingo y Javier Ruíz (ambos de Fundación Global Nature). También las visitas al Centro de Investigación y Tecnología Animal, acompañados por Ernesto Gómez, fueron de extrema utilidad.

Estoy en deuda con mi tutor, Salvador Calvet, quien me hizo la propuesta de participar en el proyecto y me puso en contacto con la Unió, organización a la que estoy agradecida. Si hay una persona que siempre me apoyó, con enorme experiencia en la gestión de proyectos, ese es José Castro.

Mi reconocimiento a la Escuela y al Máster por aportar un espacio de aprendizaje.

Finalmente, mis padres siempre están donde deben estar, un poco a distancia, pero siempre respaldándome.

## Índice de contenidos

1. INTRODUCCION .....	1
2. OBJETIVOS .....	2
3. MÉTODOS .....	2
3.1. PROYECTO RE-LIVE WASTE .....	3
3.2. MARCO GENERAL .....	3
3.3. FORMULACIÓN DEL PROCESO DE INNOVACIÓN .....	4
3.4. FUENTES .....	6
4. RESULTADOS .....	7
4.1 IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES .....	7
4.1.1. DEMANDA DE ALIMENTOS.....	8
4.1.2. RESTRICCIONES AMBIENTALES .....	8
4.1.3. NECESIDADES DE LOS AGRICULTORES .....	8
4.1.4. AGRICULTURA ECOLÓGICA .....	9
4.1.5. NECESIDADES DE LOS GANADEROS.....	9
4.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y POSIBLES SOLUCIONES.....	10
4.2.1. EL PROBLEMA A RESOLVER .....	10
4.2.2. CASO DE ESTUDIO .....	11
4.2.3. PRECIPITACIÓN DE ESTRUVITA COMO SOLUCIÓN.....	12
4.2.4. EXPERIENCIAS PREVIAS.....	13
4.2.5. CAPACIDADES DISPONIBLES EN RE-LIVE WASTE .....	15
4.3. PROPUESTA DE VALOR .....	16
4.3.1. ASPECTOS LEGALES.....	16
4.3.2. PROCESO SERMAP® .....	17
4.3.3. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO Y DEL PRODUCTO .....	17
4.3.4. CLIENTES POTENCIALES .....	18
4.3.5. ASPECTOS DIFERENCIALES DEL PRODUCTO .....	20
4.3.6. CANALES Y CADENA DE VALOR.....	22
4.3.7. ANÁLISIS DAFO .....	23
4.3.8. COSTES.....	23
4.3.9. INGRESOS .....	25
4.3.10. LEAN CANVAS .....	27
4.4. PROYECTO PILOTO .....	28
4.4.1. BASES DEL PROYECTO .....	28
4.4.2. ORGANIZACIÓN FUNCIONAL DEL PROYECTO PILOTO.....	29
4.4.3. REDUCCIÓN Y RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES .....	32
4.4.4. PRIMEROS ENSAYOS .....	32

5. DISCUSIÓN .....	35
6. CONCLUSIONES .....	37
7. REFERENCIAS .....	38

#### Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de herramientas a utilizar en el proceso de innovación .....	6
Tabla 2. Resumen de parámetros relativos a la cristalización experimental de fosfato de amonio y magnesio. ....	15
Tabla 3. Parámetros de experimentación del proceso SERMAP® .....	18
Tabla 4. Fertilizantes con contenidos de N, P, K, Ca, Mg y S, expresados como gramos de N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , KO, CaO, MgO y SO <sub>3</sub> por 100 gramos de fertilizante. ....	21
Tabla 5. Análisis económico de una instalación de precipitación de estruvita .....	24
Tabla 6. Descripción del proceso en la planta piloto.....	29
Tabla 7. Composición química promedio del influente de la planta piloto.....	31
Tabla 8. Parámetros básicos de la fracción líquida entre purín bruto y purín tratado .....	33
Tabla 9. Características de muestras de fertilizante sólido (%) según los ensayos realizados .....	34
Tabla 10. Costes de tratamientos de eliminación de Nitrógeno de purines de cerdo .....	36

#### Índice de Figuras

Figura 1. Proceso Design Thinking.....	4
Figura 2. Modelo Lean Canvas .....	5
Figura 3. Modelo “Lean Design Thinking” .....	6
Figura 4. Mapa de empatía .....	10
Figura 5. Esquema de pre-tratamiento de las deyecciones en el caso de estudio.....	12
Figura 6. Esquema de producción de estruvita a partir de estiércol.....	13
Figura 7. Número de instalaciones a gran escala por tecnología disponible en el mundo .....	14
Figura 8. Proceso SERMAP® .....	18
Figura 9. Consumo de nutrientes en España.....	19
Figura 10. Evolución del censo porcino.....	20
Figura 11. Cadena de Valor estruvita .....	22
Figura 12. Análisis DAFO de la producción de un nuevo fertilizante orgánico.....	23
Figura 13. Lean Canvas y Propuesta de Valor.....	27
Figura 14. Planta en Segorbe antes de la instalación piloto (en la explanada) .....	29
Figura 15. Localización de la planta.....	29
Figura 16. Descripción del proceso .....	31
Figura 17. Tanques de proceso .....	33
Figura 18. Muestras de suspensión tratada .....	33
Figura 19. Muestras de fertilizante orgánico sólido obtenidas en pruebas piloto.....	35

#### Acrónimos

AIS	Sistemas de Innovación Agrarios
ALIA	Empresa fabricantes de piensos y servicios para la ganadera
CITA	Centro de Investigación y Tecnología Animal
CUT	Cyprius University of Technology
DAFO	Debilidades, Amenazas, Fortalezas, Oportunidades
DAP	Di fosfato de amonio
DDD	Diclofrodifenildicloroetano
DDE	Diclofrodifenildicloroetileno
DDT	Diclofrodifeniltricloroetano
EGTOP	Grupo de Expertos de la UE para Asesoramiento Técnico en Producción Ecológica
EIP-Agri	Asociación Europea de la Innovación para la productividad agrícola y la sostenibilidad
ESPP	Plataforma Europea de Fósforo Sostenible
Eurostat	Oficina Estadística de la Unión Europea
FAFS UNAS	Facultad de Agricultura y Ciencias Alimentarias, Universidad de Sarajevo
FdR	Fin de Residuo
FERPODE	Proyecto introduction in the market of a new high quality organic fertilizer obtained by the use of poultry dejection
FYNECO	Empresa de Base Tecnológica especializada en fertilizantes
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
HCH	Hexaclorociclohexano
IMIDA	Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario
Interreg MED	Programa Interred para los 13 países de la ribera Norte del Mediterráneo
IVIA	Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias
JRC	Joint Research Centre
MAG	Fosfato monoamónico de magnesio
MAPAMA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
Metabioreso r	Proyecto Life + Planta piloto para la completa recuperación energética de diferentes residuos y subproductos ganaeros y municipales
NRD-UNISS	Desertification Research Centre, Universidad de Sassari
O-SEP	Precipitado Enriquecido de Estruvita Orgánica
PAC	Política Agrícola Común
PCDD	Dioxinas
PCDF	Furanos
PD Butmir	Empresa Pública Agraria de Butmir
PIB	Producto Interior Bruto
PYME	Pequeña y Mediana Empresa
Re-LIVE	Improving innovation capacities of private and public actors for sustainable and profitable REcycling of LIVEstock WASTE
REACH	Reglamento CE nº 1907/2006 de Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de sustancias y mezclas químicas
SERDA	Agencias de Desarrollo Económico Regional de Sarajevo
SERECO	Empresa especializada en plantas y equipos de tratamiento de aguas residuales

SSP	Super fosfato simple
TRL	Technology Readiness Level
TSP	Super fosfato triple
UE	Unión Europea
Unió	Unió de Llauradors i Ramaders
Wavalue	Proyecto para producir fertilizantes comerciales a partir de digestato de plantas de biogás

## 1. INTRODUCCION

La necesidad del cumplir la normativa ambiental en zonas de alta densidad ganadera ha impulsado el desarrollo de la “economía circular” que aspira a cambiar el modelo lineal “tomar–fabricar–consumir–desechar” por un enfoque de minimizar residuos y valorizar los materiales generados. En este trabajo evaluamos las posibilidades de la estruvita con propiedades fertilizantes en el marco de un proyecto piloto en una zona del Mediterráneo español.

La concentración de granjas porcinas en algunos territorios puede inducir a contaminación del suelo y agua derivados del excedente de nutrientes. La ganadería porcina ha tendido a modelos intensivos con gran número de granjas y cada vez de mayor dimensión. La cabaña porcina en España supera los 30 millones (MAPA, 2019), con un desequilibrio en el balance de nutrientes en algunos territorios. Según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPAMA, 2018) el balance de fósforo en la agricultura española arroja un saldo neto de 3,5 kg/ha, siendo relativamente elevado en Comunitat Valenciana (19,6 kg/ha), Cataluña (18,1), Madrid (15,8) y Murcia (14,2). Es un problema ya que los límites de aplicación de fósforo en tierras agrícolas son cada vez más estrictos para cumplir con la Directiva Marco del Agua (Comunidades Europeas, 2000).

En la actualidad las explotaciones ganaderas son en su mayoría independientes de la tierra, lo que supone un desafío para la gestión del excedente de deyecciones. Ello se agrava en zonas próximas a las poblaciones, generando problemas ambientales que han sido reconocidos por la Unión Europea (Directiva 91/676 / CEE sobre nitratos y la Directiva 2010/75 /UE sobre emisiones industriales).<sup>1</sup>

Una salida clásica es la valorización agronómica de los purines como fertilizante. Dicha valorización es complicada por la concentración de la cabaña ganadera en algunas zonas que hace difícil su aplicación agrícola y por los costes de manejo y transporte de los purines. En muchas zonas de alta densidad ganadera no existen tierras disponibles que puedan recibir volúmenes significativos de estiércol sin provocar contaminación de suelos y acuíferos.

Se trata de un problema complejo que tiene que ver con la localización de las granjas (Calafat et al. 2015), pero también con estrategias de gestión que no pueden ser únicas. Son necesarios enfoques colaborativos, como el que presentamos en este trabajo, que hagan compatible la eliminación de los excedentes de purines con una orientación comercial de los residuos.

La posibilidad del paso de residuo a producto comercial nos motiva a explorar la precipitación de estruvita (fosfato hidratado de fósforo y amonio) por adición controlada de cloruro de magnesio, proceso que ha sido utilizado y mejorado (FERTINNOWA, 2018). Este proceso ha sido ensayado para tratar efluentes de digestores anaeróbicos, así como deyecciones de cerdos y aves de corral. La recuperación de fósforo puede reducir la dependencia de la roca de fosfato como materia prima (Huygens et al. 2019). La presente propuesta explora las posibilidades de la estruvita comercializada como fertilizante directamente “como está”, tras un acondicionamiento (por ejemplo, granulado, secado), o como materia prima (ingrediente) para la producción de fertilizantes o mezclas.

La composición de los purines de porcino es favorable para la recuperación de P debido su alto contenido de P (3-4 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por tonelada, Schoumans et al., 2017) y porque este fósforo está presente principalmente en forma inorgánica (Brod et al. al., 2015).

---

<sup>1</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/TXT/?uri=CELEX:32010L0075>.

El marco legal actual para sales de fosfato precipitadas o materiales recuperados similares a la estruvita varía entre los Estados miembros de la UE (ESPP, 2017). Las sales de fosfato precipitadas se pueden usar legalmente como fertilizante en Países Bajos, Bélgica, Alemania, Francia, Dinamarca y el Reino Unido. El nuevo Reglamento de la UE sobre fertilizantes que está siendo negociado actualmente podría incluir el uso de este tipo de fertilizantes recuperados.

Este TFM se estructura en las siguientes etapas. Primeramente, el Capítulo 2 presenta el objetivo principal y los objetivos secundarios del trabajo. Seguidamente, el trabajo desarrolla las distintas etapas de la formulación del modelo de negocio que pasan por plantear su metodología (Capítulo 3), sus antecedentes y necesidad (Capítulo 4), el planteamiento de producción de estruvita como solución (Capítulo 5) y la propuesta de valor (Capítulo 6). Finalmente, se presentan los resultados del proyecto piloto (Capítulo 7) y las principales conclusiones de cara a lo que pueden ser las posibilidades de aplicación real de la propuesta (Capítulo 8).

## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal del TFM es formular un modelo de negocio para la producción de un precipitado enriquecido de estruvita. El modelo se sustenta en una experiencia piloto realizada en unas instalaciones del Centro de Investigación y Tecnología Animal (CITA) localizadas en Segorbe, provincia de Castellón.

Para ello, se plantean como objetivos secundarios:

- Aplicar modelos de formulación estratégica (Design Thinking y Modelo Lean Canvas) al estudio de viabilidad de la reutilización de purines de cerdo y otros influentes orgánicos para la cristalización de estruvita. Los modelos se encuadran en un marco más general de innovación sistémica.
- Evaluar la viabilidad técnica y económica de la propuesta de valor.
- Validar la propuesta en una experiencia piloto.

El presente TFM parte de una experiencia de colaboración entre actores muy diversos, en el marco del proyecto internacional Interreg RE-LIVE. Una vez que se encuentra una nueva tecnología prometedora, ¿Cómo se introduce en el mercado? A menudo, las buenas ideas no alcanzan su potencial. Nos planteamos desarrollar un modelo de negocio para el nuevo producto. Este documento describe elementos clave de dicho modelo.

## 3. MÉTODOS

La formulación de un modelo de negocio tiene en cuenta las tecnologías disponibles e intenta ser aplicable a un contexto concreto. La propuesta se basa en la recuperación de estruvita a partir de deyecciones ganaderas. Las ventajas de dicha propuesta deben ser evaluadas como alternativa para el tratamiento de residuos, lo que significa que, aunque tenga un coste, se espera que sea económicamente asumible frente a otras alternativas.

La estruvita es una sal cristalina blanca, químicamente conocida como fosfato monoamónico de magnesio o MAP ( $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Se obtiene del estiércol cuando el fósforo (P) en el estiércol se disocia inicialmente del calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), y luego se une con  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{NH}_4^+$ .

Nuestro enfoque definirá una propuesta de valor y los pasos necesarios para lograrla. El proceso se construye sobre unas bases colaborativas proporcionadas por el proyecto Interreg. A continuación, introducimos el proyecto RE-LIVE WASTE para, seguidamente, establecer las etapas de la búsqueda de soluciones innovadoras.

### 3.1. PROYECTO RE-LIVE WASTE

RE-LIVE WASTE “Improving innovation capacities of private and public actors for sustainable and profitable recycling of livestock waste” está financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, dentro del programa Interreg-MED, con socios de cuatro países mediterráneos.<sup>2</sup> El objetivo del proyecto es mejorar las capacidades de innovación de los actores involucrados en el manejo de los desechos de la ganadería intensiva.

El proyecto pretende favorecer que el sector ganadero sea más sostenible a través de la transformación de los residuos de ganado en un recurso de valor fertilizantes. Es una idea que interesa diferentes tipos de actores o *stakeholders*: agricultores, proveedores de tecnología y tomadores de decisiones. Para ello se realizan 4 acciones piloto en países mediterráneos, uno de los cuales corresponde al presente TFM. Estas acciones consisten en plantas a pequeña escala para la precipitación de estruvita por medio de un cristalizador capaz de realizar la reducción y la recuperación de nitrógeno junto con fósforo. Las acciones piloto se evalúan desde una perspectiva no sólo tecnológica sino también empresarial, que es uno de los cometidos del presente TFM. Es un esfuerzo en red: PYMEs, organismos de investigación, autoridades públicas, organizaciones del sector y otras partes interesadas participan en el proyecto.

### 3.2. MARCO GENERAL

Conviene partir de un marco conceptual de innovación tenga en cuenta las necesidades de varios tipos de actores en problemas complejos. Un enfoque posible es el de Sistemas de Innovación Agrarios (AIS) (World Bank, 2006) donde la innovación se concibe como un proceso combinado de orden tecnológico (producción ganadera, fertilizantes, prácticas agronómicas) y no tecnológico (dinámicas sociales de colaboración entre entidades).

El enfoque sistémico se pone en práctica a través de un proceso de formulación estratégica. Shut et al. (2015) consideran cinco criterios para la selección de métodos:

1. Deben ser rigurosos y capaces de generar datos cualitativos y cuantitativos.
2. Deben facilitar tanto el análisis "interno" como el "externo". El análisis interno utiliza información por parte de los interesados. Sin embargo, a menudo los protagonistas de la innovación tienen una visión insuficiente del problema.
3. Deberían poder implicar a diferentes partes interesadas, facilitando la colaboración.
4. Deberían proporcionar detalles sobre la capacidad de innovación en el sistema agrícola y sobre el funcionamiento de los sistemas de apoyo a la innovación.

---

<sup>2</sup> Más información del proyecto en el sitio web <https://re-livewaste.interreg-med.eu>.

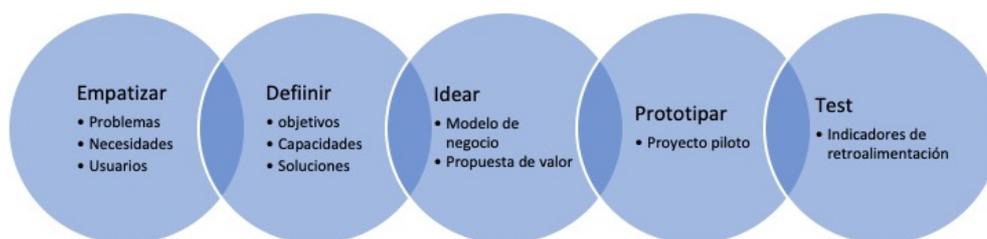
### 3.3. FORMULACIÓN DEL PROCESO DE INNOVACIÓN

Algunos problemas complejos pueden ser abordados mediante modelos de negocio. El trabajo de Geissdoerfer et al. 2016 describe los modelos negocios como:<sup>3</sup>

*“representaciones simplificadas de elementos, e interacciones entre estos elementos, que elige una unidad organizativa para crear, entregar, capturar e intercambiar valor”*

En nuestro caso, formularemos una propuesta de valor a partir de la combinación de dos modelos de innovación. Se trata del Pensamiento de Diseño (*Design Thinking*) y del modelo *Lean Canvas*. El primero está orientado a la elaboración de un proyecto piloto (caso del proyecto RE-LIVE WASTE en que se basa este trabajo), mientras que el segundo describe una propuesta de valor, incluyendo mecanismos de prueba y revisión. Design Thinking desarrolla soluciones innovadoras, incorporando preocupaciones, intereses y valores de las personas en el proceso de diseño. El concepto se originó en la empresa IDEO y sus firmas de diseño asociadas (Kelley y Littman, 2001). Design Thinking comprende cinco características principales:

- I. un enfoque centrado en las personas,
  - II. un fuerte interés en experimentar con prototipos
  - III. un planteamiento colaborativo en equipos multidisciplinares,
  - IV. una visión integradora de problemas complejos, y
  - V. cinco etapas de formulación: "empatizar", "definir", "idear", "prototipo" y "probar".
1. **Empatizar** comprende la **identificación de las necesidades** de los potenciales usuarios.
  2. **Definir el Problema**, las capacidades disponibles, las herramientas y las posibles soluciones.
  3. Idear la **Propuesta de Valor** o una solución innovadora.
  4. **Prototipo** para desarrollar un producto mínimo viable.
  5. **Prueba piloto** para recopilar información que implique contrastar el prototipo y realizar posibles cambios o mejoras.



Fuente: Kelley y Littman (2001) y elaboración propia

**Figura 1. Proceso Design Thinking**

Este trabajo contempla todas las etapas mencionadas. Las dos últimas fases corresponden a actividades piloto del proyecto RE LIVE WASTE. La evaluación de las acciones piloto permitirá identificar las fortalezas de las soluciones probadas, en términos socioeconómicos y ambientales. La

<sup>3</sup> Para ello se basa en definiciones de varios autores como Chesbrough y Rosenbloom (2002) y Osterwalder et al. (2010), entre otros.

fase "Idear" integra la formulación de una propuesta de valor. Aquí es donde incorporamos el método Lean Canvas que a su vez hibrida los modelos Business Model Canvas, propuesto por Alexander Osterwalder (Osterwalder et al. 2014) y Lean Startup, propuesto por Ries (2011). Este método híbrido Lean Canvas cuyo formulador es Ash Maurya incorpora 9 enfoques que representan los aspectos clave que una Start up (empresa emergente) debe tener presente:

1. Definir **clientes** objetivos
2. Identificar **problemas** que nuestro producto puede solucionar
3. Propuesta de valor donde se indica **lo que ofrecemos** para solucionar estos problemas.
4. Listar las **características** principales **que solucionarán** el problema
5. Identificar los **canales** que darán a conocer nuestra empresa
6. Definir vías de **ingresos**
7. Analizar los principales **costes**
8. Establecer **métricas clave** que indiquen si estamos desarrollando correctamente nuestro modelo de negocio
9. Expresar aquello que nos hace especial frente a nuestra **competencia**

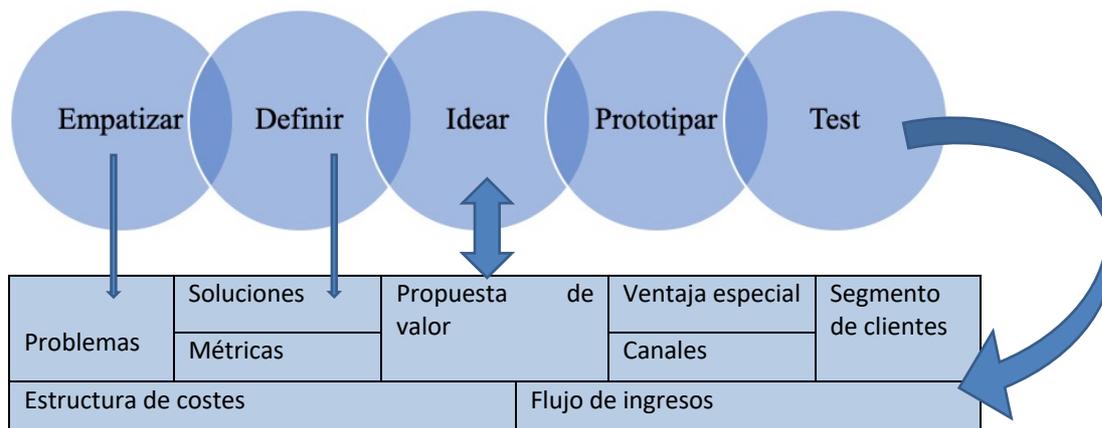
En realidad, las etapas 1 a 4 del Lean Canvas combinan perfectamente con las fases 1 a 3 del Design Thinking. El Lean Canvas se corresponde con la fase "Idear" puesto que traduce dichas ideas en un modelo de negocio. El "canvas" o lienzo sienta las bases para transformar el proyecto en una posible Startup.



Fuente: Adaptado de Maurya (2012)

**Figura 2. Modelo Lean Canvas**

En este trabajo proponemos una síntesis de modelos de innovación en la línea de lo que se puede denominar "Lean Design Thinking" (Muller y Thoring, 2012). La Figura 3 muestra un modelo que integra los primeros pasos del Design Thinking (empatizar, definir, idear) con el Lean Canvas.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3. Modelo “Lean Design Thinking”**

### 3.4. FUENTES

En los sucesivos capítulos iremos identificando las fuentes concretas de datos e información que resumimos en la Tabla 1.

**Tabla 1. Tipos de herramientas a utilizar en el proceso de innovación**

Etapa	Herramienta
Identificación de necesidades (Empatizar)	Datos secundarios; Entrevistas semi-estructuradas Mapa de empatía
Definición del problema (Definir)	Taller RE-LIVE WASTE Investigación tecnológica publicada
Propuesta de valor	Focus Group de participantes del proyecto
Prototipado y Prueba	Proyecto piloto y datos experimentales del mismo

Fuente: Elaboración propia

En síntesis, cinco métodos complementarios para recogida de datos han sido utilizados.

- **Talleres multi-actor.** Se centran analizar internamente la capacidad de innovación en el sistema agrícola y las condiciones estructurales proporcionadas por el sistema de innovación agrícola. La metodología del taller ha sido habitual en el proyecto RE-LIVE WASTE y muy útil para definir y analizar prototipos. Los talleres participativos identifican, categorizan y analizan restricciones. El proyecto RE-LIVE WASTE realizó varios talleres en València.
- **Entrevistas individuales semiestructuradas.** Sirvieron de guía para las fases de Empatizar y de Definir, con elaboración de DAFO y el mapa de empatía. Recogen datos de expertos y validan datos secundarios o recopilados en los talleres. Los expertos, 12 en total, fueron seleccionados intencionalmente entre los socios de RE-LIVE WASTE o en base a una selección tipo “bola de nieve” donde los entrevistados hacen sugerencias sobre quién más debería ser consultado (Russell Bernard, 2006).
- **Reuniones focales con** el Comité coordinador del proyecto RE-LIVE WASTE, que fueron válidas para formular la proposición única de valor.
- **Datos secundarios,** recogidos de fuentes oficiales, informes de políticas, proyectos, legislación y evaluaciones de proyectos. En nuestro caso utilizamos: a) datos proporcionados por artículos científicos sobre tecnologías de recuperación de fósforo; b) datos tecnológicos proporcionados

por los socios del proyecto RE-LIVE WASTE: c) manuales de gestión de residuos ganaderos suministrados por organismos públicos; d) datos estadísticos sobre tendencias del mercado suministrados por el Ministerio y Departamentos de Agricultura de las Comunidades Autónomas.

- Datos experimentales. Se recogieron en la fase de validación del prototipo, realizados en la planta experimental de tratamiento de residuos del CITA en Segorbe, a la que nos referimos al final de este TFM.

Se estableció una guía para las entrevistas semi-estructuradas que contenían los siguientes puntos a discutir con los expertos consultados, principalmente participantes del proyecto RE-LIVE WASTE. La guía contiene los siguientes aspectos:

Prospectiva. ¿Cuál es su visión del futuro?:

- Exigencias medioambientales en el sector de la ganadería intensiva.
- Suficiencia de las estrategias disponibles para reducir los efectos ambientales de las deyecciones animales
- Grado de control sobre el exceso de purines en zonas de alta densidad ganadera
- Existencia de una comunidad de explotaciones ganaderas abierta a las nuevas tecnologías de tratamiento de purines.
- Utilización de gestión colectiva de purines.

Grado de conocimiento y aplicación de estrategias tecnológicas ¿Cuáles son las tecnologías disponibles?

- Utilización directa del purín para la fertilización de las tierras
- Transporte de purines a zonas con menor densidad ganadera.
- Digestión anaerobia obteniéndose como resultado biogás
- Separación en dos fases: fracción sólida (más concentrada) y fracción líquida (más diluida).
- Compostaje de la fracción sólida.
- Digestión aeróbica del purín líquido.
- Construcción de humedales artificiales
- Precipitación de estruvita

Mapa de empatía y análisis DAFO. El Mapa recoge lo que pueden ver, pensar, oír y hacer los clientes potenciales del proceso de recuperación de P en forma de estruvita, incluyendo entre ellos a agricultores y ganaderos con cierta capacidad de innovación y sensibilidad ambiental. El DAFO valora las debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades de obtener el fertilizante orgánico a base de estruvita.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES

Se plantea la recuperación de nutrientes para reducir los costes para cumplir las normativas de residuos. Dada la legislación nacional y de la UE sobre el manejo de nutrientes y la calidad del agua (Política Agrícola Común, Directiva Marco del Agua, Directiva de Nitratos, etc.), un tratamiento terciario con eliminación mejorada de P ya es práctica común en muchos tratamientos de aguas residuales municipales e industriales (European Environment Agency, 2013). En este capítulo nos interesa conocer la necesidad de un nuevo producto a base de sales de fosfato precipitadas a partir de deyecciones ganaderas. Para ello hemos utilizado fuentes de datos secundarios, pero también hemos

consultado a expertos del proyecto RE-LIVE WASTE. La red del proyecto ha sido diseñada para asegurar conexiones entre actores de la cuádruple hélice (investigación, empresa, sector público y sociedad civil). Implica a universidades y organismos de investigación (NRD-UNISS, CUT, FAFS UNSA), autoridades públicas (IMIDA, Laore, DoE), 2 empresas especializadas (SERECO y FYNECO), una agencia sectorial regional (SERDA), y 4 PYMES ganaderas (ALIA, Animalia Genetics, Cooperativa Produttori Arborea, PD Butmir), y 1 organización profesional agraria (la Unió).

#### 4.1.1. DEMANDA DE ALIMENTOS

El sector agrícola utiliza cada año grandes cantidades de fertilizantes N y P. Hay consenso en los expertos en que el uso de fertilizantes P depende del crecimiento de la población, el cambio de las dietas, y del crecimiento del PIB. Según Springmann et al. (2018) se espera un crecimiento de la población mundial de 6.9 mil millones en 2010 a 10 mil millones en 2050 y una multiplicación del PIB por un factor entre 2,6 y 4,2. Seguirá habiendo una demanda de fertilizantes. Sin embargo, el consumo de fertilizantes minerales en la UE-28, que según Eurostat alcanzaba en 2017 1,3 millón de toneladas de P, tendrá probablemente un crecimiento lento en la próxima década. Italia aparece como el mayor consumidor de fosfatos para fertilizantes, con una cuota del 17% en la UE-28 en 2017. Le siguen Francia y España con un 14% y Polonia, con un 11%. La estabilización del consumo aparente de fertilizantes minerales de P en Europa se debe en gran parte a cambios en la Política Agrícola Común (PAC) desde 2003. El más relevante ha sido el desacoplamiento de los pagos directos y su vinculación al cumplimiento de condiciones relacionadas con la calidad ambiental, la inocuidad alimentaria y el bienestar animal.

#### 4.1.2. RESTRICCIONES AMBIENTALES

De acuerdo con el trabajo citado de Springmann et al. (2018) los niveles de aplicación de fósforo se sitúan ya en la actualidad por encima de los umbrales admisibles en el planeta. Según este artículo, un paquete tecnológico ambicioso en las tecnologías de gestión-recuperación del fósforo y la mayor eficiencia en la fertilización nitrogenada y fosfórica podrán reducir los impactos de la aplicación de fertilizantes en suelo y agua. Por otro lado, se estima que se extraen anualmente más de un millón de toneladas de fosfato de roca (Kool et al. 2012). Los fertilizantes a base de nitrógeno se producen principalmente a partir de amoníaco a través del proceso Haber-Bosch, que es muy exigente en energía. Cualquier método que permita la recuperación de nutrientes para ser reciclados como fertilizantes es de gran interés para reducir el consumo de energía, las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y el agotamiento de los recursos naturales.

Según el informe del Joint Research Centre sobre propuestas técnicas para nuevos materiales fertilizantes en virtud de la revisión del Reglamento sobre productos fertilizantes (Huygens et al. 2019), la apertura del mercado de fertilizantes a la estruvita y otros materiales derivados de desperdicios biogénicos contribuirá a la sustitución del fosfato de roca extraído y de los fertilizantes P procesados. Para 2030 se espera un uso significativo de materiales recuperados de aguas residuales municipales, lodos y estiércol.

#### 4.1.3. NECESIDADES DE LOS AGRICULTORES

Es probable que la recuperación de P en forma de estruvita tenga lugar en el futuro en Europa occidental debido a la mayor sensibilidad ambiental en estos países. Los agro-ganaderos no siempre tienen instalaciones para almacenar grandes volúmenes de estiércol y tienen que aplicarlo cuando el potencial de lixiviación de nutrientes es mayor (por ejemplo, en condiciones de lluvia). Pero los nutrientes también son muy móviles en suspensión en comparación con una forma cristalizada de estruvita, lo que aumenta el riesgo de contaminación. La aceptación de nuevos fertilizantes depende de las evidencias sobre sus beneficios agronómicos en comparación con los fertilizantes tradicionales (Antille et al., 2013). Según los expertos consultados, los nuevos materiales deben estar disponibles

preferentemente en una forma física que permita su distribución homogénea en el campo utilizando equipos de aplicación convencionales.

Según el estudio citado de Huygens et al. (2019), la eficiencia agronómica de las sales de fosfato precipitadas es similar a la de los fertilizantes obtenidos de minería y de los sintéticos. En los ensayos de cultivos de cereal fertilizados con estruvita, se observa una reducción en el número de espigas de grano debido a la deficiencia de P a corto plazo, pero se ve contrarrestada por la capacidad del sistema de raíces del cultivo para absorber P en las diversas etapas de crecimiento de la planta, compensando su menor tasa de disolución de P en relación con los fertilizantes P solubles en agua (Talboys et al. al., 2016).

#### 4.1.4. AGRICULTURA ECOLÓGICA

El modelo de agricultura ecológica ofrece un potencial para la estruvita. La fabricación de estruvita a partir de materias primas orgánicas está en línea con los objetivos, criterios y principios de la agricultura ecológica y la economía circular. El Grupo de Expertos de la UE para Asesoramiento Técnico en Producción Ecológica (EGTOP) ha evaluado positivamente algunos expedientes que proponen la autorización de productos de P reciclado como fertilizante bajo el Reglamento de la Agricultura Orgánica de la UE (889/2008). El EGTOP concluyó que la recuperación de estruvita reduce las pérdidas de N y P en las aguas superficiales, recicla nutrientes y reduce el consumo de recursos de P no renovables, por lo que la estruvita debería autorizarse para la agricultura ecológica siempre que el método de producción garantice la higiene y la seguridad de los contaminantes.

En la actualidad, el estiércol y el compost son la fuente principal de P en la agricultura ecológica. Según Eurostat, en 2017, el porcentaje del área agrícola total utilizada dentro de la UE para la agricultura ecológica fue del 7% (en España, del 8,7%). En los últimos 5 años la superficie agrícola con sistema ecológico aumentó un 25% en la UE. Así, el sector de agricultura ecológica podría convertirse en un mercado agrícola importante en el futuro cercano. La PAC reconoce el papel de la agricultura ecológica y, de hecho, bajo el primer pilar de la PAC, las explotaciones ecológicas se benefician del pago verde directo sin cumplir ninguna obligación adicional por su contribución global significativa a los objetivos ambientales.

#### 4.1.5. NECESIDADES DE LOS GANADEROS

Las ventajas de recuperar N y P son múltiples: algunos agro-ganaderos pueden reducir los costes de los fertilizantes; otros tienen limitaciones para esparcir estiércol y purines bajo ciertas condiciones, períodos, cantidades o lugares, y al mismo tiempo tienen instalaciones de almacenamiento limitadas; todos se enfrentan a estrictas regulaciones en la UE. Finalmente, las producciones animales pueden ganar valor agregado a los ojos de los consumidores con buenas prácticas que reducen la contaminación del suelo y el agua. Para acometer una gestión correcta de estiércol semi-líquido (purín), los ganaderos deben adaptarse a las limitaciones de la normativa que pueden transformarse en oportunidades. La Directiva 91/676/CEE sobre nitratos permite mantener la calidad del agua en la Unión Europea evitando la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

El ganadero debe tomar decisiones sobre cómo gestionar las deyecciones en función del contexto local. El estiércol se define como un subproducto animal de categoría 2 de acuerdo con el Reglamento (CE) no 1069/2009. La mayoría de los países europeos tienen regulaciones similares con respecto a (i) licencias requeridas para albergar animales, (ii) almacenamiento de estiércol y lodos para permitir una mejor utilización agronómica y (iii) períodos prohibidos para la extensión de la superficie (generalmente los meses de invierno). Una preocupación común es la contaminación del agua por nitratos, pero también la emisión de amoníaco y los olores. En las áreas de alta densidad ganadera, con excedente de nutrientes, se plantea la transformación del purín en formas que faciliten su transporte y valorización. En 2010, se procesó aproximadamente el 7,8% de la producción de estiércol

en la UE, lo que equivale a un volumen total de estiércol de 108 millones de toneladas/año, con 556 mil toneladas de N y 139 mil toneladas de P (Flotats et al 2013). Al menos 45 tecnologías diferentes de tratamiento de estiércol están disponibles (Foget et al 2011). Los niveles más altos de procesamiento de estiércol de ganado se observan en Italia, Grecia y Alemania, con 36,8%, 34,6% y 14,8% de su producción de estiércol, respectivamente.

En la Figura 4 se presenta el “Mapa de empatía”, resultado de entrevistas a expertos en el marco de RE-LIVE WASTE. En la parte inferior izquierda se incorporan las principales preocupaciones, mientras que en la parte inferior izquierda se recogen las principales motivaciones para la adopción de nuevas tecnologías de recuperación de fósforo para la fabricación de fertilizante orgánico.



Fuente: Elaboración propia a partir de entrevistas a expertos del proyecto RE-LIVE WASTE

**Figura 4. Mapa de empatía**

## 4.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y POSIBLES SOLUCIONES

En esta etapa concretamos, en primer lugar, el problema a resolver (“definimos”). En segundo lugar, exploramos las soluciones tecnológicas para la recuperación de P en forma de un fertilizante que pueda tener un valor comercial, en nuestro caso la estruvita. Finalmente, describimos las capacidades y alianza de actores que intervienen en la solución.

### 4.2.1. EL PROBLEMA A RESOLVER

El problema a resolver afecta no sólo a un potencial usuario sino a varios, en particular ganaderos y agricultores, pero también las administraciones públicas.

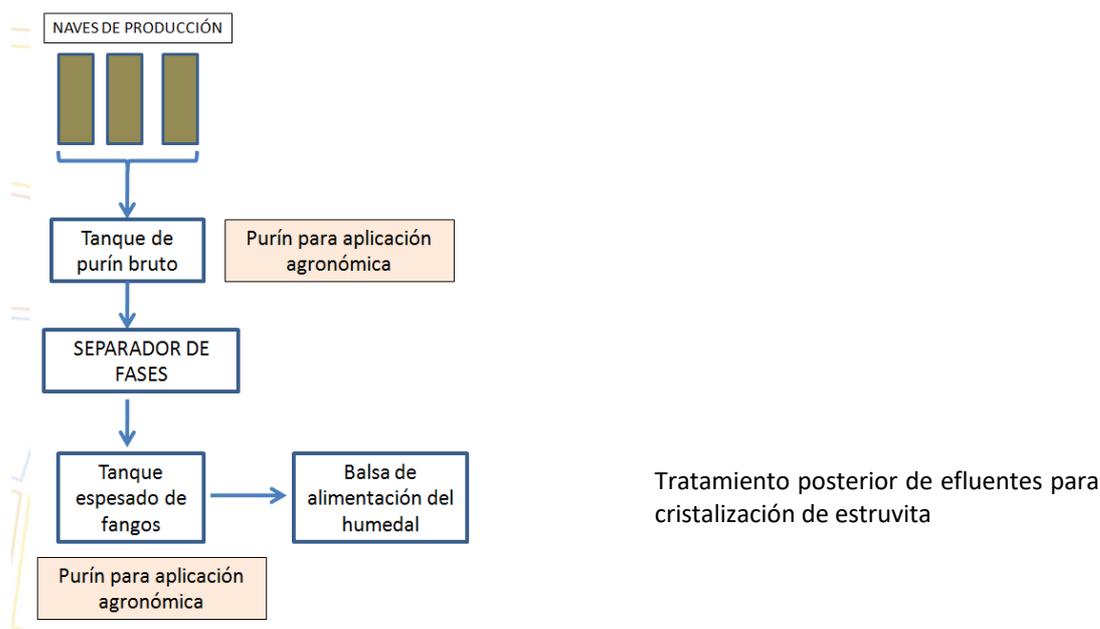
1. A medida que las reservas de fosfato mineral económicamente disponibles comienzan a disminuir, la tecnología debe aportar fuentes alternativas que permitan prescindir de este mineral.
2. Los altos niveles de fósforo aplicados a la tierra que exceden las necesidades del cultivo aumentan el potencial de que el fósforo se filtre al agua. Los campos que reciben desechos animales a menudo tienen un alto nivel de P en las muestras de análisis de suelo.
3. Los costes de transporte para trasladar el excedente de nutrientes a otras zonas de menor densidad ganadera pueden ser excesivos.

Exploraremos una solución tecnológica que permita desarrollar, tras una separación sólido-líquido del purín, un fertilizante especial de liberación lenta de magnesio y fósforo a partir de la recuperación de nutrientes derivados de deyecciones ganaderas. Más específicamente, el proceso tecnológico debería, entre otros aspectos:

- Introducir en el mercado un fertilizante de liberación lenta que pueda contribuir a la eliminación de la contaminación de las aguas subterráneas y al ahorro con el tiempo, de nutrientes (N y P) de acuerdo con los requerimientos biológicos de los cultivos.
- Eliminar el amoníaco, tanto de las aguas residuales zootécnicas brutas como de las aguas residuales anaeróbicas (digestato), reduciendo la concentración de amonio en las aguas residuales hasta valores compatibles con procesos biológicos nitro-denitro.
- Cumplir con la normativa de la UE que limita las emisiones de nitrógeno a la atmósfera (particularmente amoníaco y óxidos de nitrógeno) como la causa principal de las lluvias ácidas;
- Contribuir apreciablemente a la contención de los malos olores al reducir la difusión de amoníaco, sulfuro de hidrógeno y ácidos volátiles.
- Superar la restricción de disponibilidad de suelo, de acuerdo con la directiva "Nitrato";
- Poder reutilizar plantas de tratamiento de purines ya en uso, con los cambios estructurales adecuados. Es deseable la reutilización de instalaciones desmanteladas (depósitos, tanques, bombas, etc.) que ya están presentes en una planta obsoleta.
- Poder diseñar sistemas adaptables a pequeña-mediana escala adaptable a cooperativas o asociaciones de explotaciones individuales.

#### 4.2.2. CASO DE ESTUDIO

El proyecto trabaja con una cooperativa ganadera de la región de Murcia. En dicha provincia hay un censo de porcino de más de 1,7 millones de cabezas, según las Encuestas ganaderas del MAPAMA. El proyecto RE-LIVE WASTE adopta una tecnología aplicable a explotaciones de cerdo para engorde. La cooperativa se localiza en un municipio que, según el último Censo Agrario, reúne a más del 40 % de las explotaciones ganaderas de la región (casi 300 explotaciones, con una producción de más de 3 millones de m<sup>3</sup> de purín al año, según expertos del proyecto). En la región se están ejecutando diversos proyectos integrales de tratamiento del purín mediante una combinación de la separación por fases, balsas de aireación-decantación y filtrado por humedales artificiales (Figura 5). La explotación en cuestión cría cerdos para engorde con un número promedio de lechones producidos por año de 15.375. De estos, 2.800 se engordan hasta un peso promedio de 80 Kg. También hay algunas cerdas de cría para llevar a cabo una pequeña producción en un ciclo cerrado. La producción diaria de estiércol de cerdo es de alrededor de 40 m<sup>3</sup>.



Fuente: Faz Cano (2015)

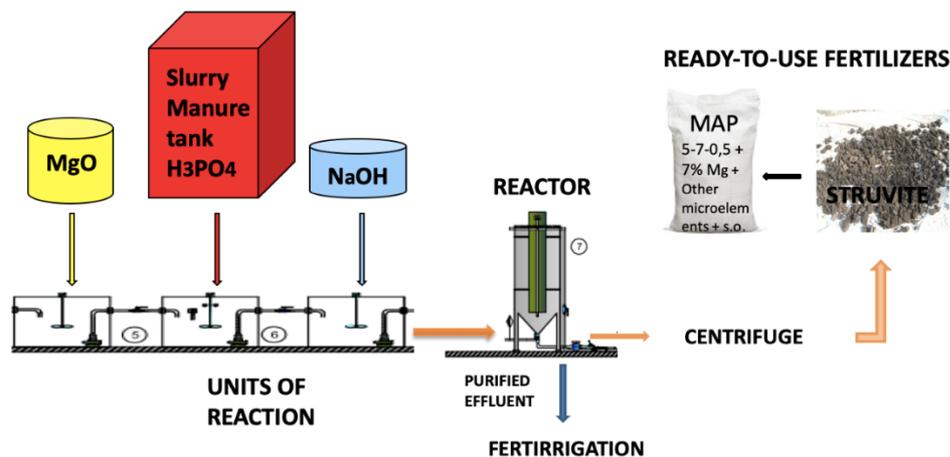
**Figura 5. Esquema de pre-tratamiento de las deyecciones en el caso de estudio**

La empresa ha instalado recientemente un separador centrífugo que tiene una capacidad de trabajo de 5-10 m<sup>3</sup>/h y un rendimiento de captura de sólidos de más del 75%. La fracción líquida obtenida, que todavía tiene un alto contenido de nitrógeno de amonio (N-NH<sub>4</sub>), aproximadamente 1700 mg / l, se someterá al proceso de des-amonificación experimental con la producción de estruvita, como parte de un tratamiento integral. La explotación ya dispone de un esquema de gestión integral en que a la separación de fases sólido líquido pueden seguirle el espesado de fangos y un tratamiento de filtrado por humedal. Se trata de una estrategia adicional de gestión. Sobre este caso construiremos el modelo de negocio que se explora en el próximo capítulo, incluyendo la precipitación de sales fosfatadas como parte de un tratamiento posterior del efluente.

Flotats et al. (2011) sostienen que para evitar la interferencia de la materia orgánica y obtener un producto compuesto principalmente por los precipitados deseados el sistema debe combinarse también con métodos que se ocupen de la eliminación de la materia orgánica, como la digestión anaeróbica, que no es el caso del influente tratado en nuestro estudio. Entendemos que se debe poder ensayar una tecnología que permita un diseño (i) aplicable a distintos tipos de residuos orgánicos; (ii) viable a una escala relativamente pequeña; (iii) que recupere simultáneamente N y P; (iv) que pueda ser combinado con diversos pretratamientos alternativos, con o sin digestión anaeróbica (que permite generar energía eléctrica pero requiere una escala de producción con mayores costes de capital).

#### 4.2.3. PRECIPITACIÓN DE ESTRUVITA COMO SOLUCIÓN

La estruvita puede ser obtenida en reactores donde se crean condiciones físico-químicas específicas (pH, fuerza iónica, etc.) que favorecen la formación de dicha sal cristalizada y su precipitación. A su vez, la producción de estruvita es una de las tecnologías conocidas para recuperar nutrientes del estiércol animal y de los digestatos (Figura 6).

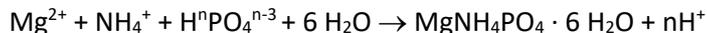


Fuente: Proyecto RE-LIVE WASTE

**Figura 6. Esquema de producción de estruvita a partir de estiércol**

Según el EIP-Agri Focus Group on Nutrient Recycling, de todas las tecnologías disponibles para recuperar nutrientes, solo un número limitado se utiliza completamente a escala de granja. Esto se debe a varias limitaciones con respecto al sustrato, pretratamientos, etc.

A pesar de las diferencias entre los sustratos para obtener estruvita, la reacción química es una reacción de precipitación que tiene lugar en condiciones alcalinas, cuando la concentración de  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$  y  $PO_4^{3-}$  excede la solubilidad del producto, de acuerdo con la siguiente reacción:



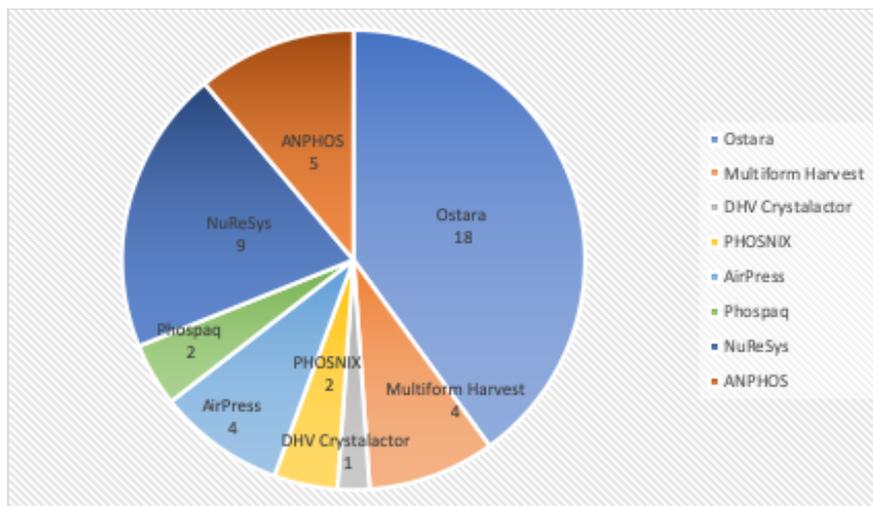
La precipitación depende de varios parámetros, pero es función principalmente del pH. Por ejemplo, cuando el pH aumenta las concentraciones de  $Mg^{2+}$  y  $NH_4^+$  disminuyen y la de  $PO_4^{3-}$  aumenta. El valor del pH de la solución también afecta a la solubilidad de la estruvita, siendo mínima con valores de pH entre 9 y 10,7.

#### 4.2.4. EXPERIENCIAS PREVIAS

La estruvita no ha sido todavía aprobada para ser etiquetada como fertilizante en la UE. Por tanto, el presente TFM se sitúa dentro de lo que puede calificarse como estudios previos de viabilidad. Según el FocusGroup mencionado anteriormente, la recuperación de estruvita se ha probado a nivel piloto con más de 40 instalaciones en todo el mundo a gran escala, principalmente con efluentes de digestores de lodos municipales y aguas residuales industriales que utilizan la eliminación biológica de P. Entre las tecnologías disponibles se pueden citar Ostara, Multiform Harvest, PHOSNIX, DHV Crystalactor, AirPrex, Phosphaq y Anphos, entre otras. El estudio de Ghosh et al (2019) realiza una evaluación exhaustiva de estas tecnologías, que tienen en común que pueden lograr más o menos un 80% de eficacia en la reducción de P con una tasa promedio de producción de estruvita de 8 kg/kg de influente.

Estas tecnologías inducen la precipitación de estruvita controlando el pH mediante la adición de NaOH o la extracción de aire. Se agrega MgO o  $MgCl_2$  como fuente de Mg para mantener la relación Mg:P 1:1. La tecnología Ostara, muy popular en Norteamérica, es capaz de producir gránulos comercializables más grandes con eficiencias razonables de extracción y recuperación de P. Sin embargo, se trata de una tecnología con alto flujo de recirculación y velocidad de flujo ascendente con

un tiempo de retención de cristales más prolongado que produce mayores costes de capital y funcionamiento. El proceso Multiform Harvest tiene menores costes de capital y operación, pero produce estruvita de menor calidad. La tecnología PHOSNIX es capaz de producir gránulos de tamaño sustancial pero estos gránulos requieren un procesamiento adicional para ser usados como fertilizante. AirPrex tiene la capacidad de lograr hasta un 98% de eficiencia de eliminación de P, pero el producto final es de menor calidad con un consumo alto de energía. Debido a estas limitaciones en las tecnologías disponibles, todavía queda mucho por recorrer para alcanzar procesos económicamente viables y tecnologías eficientes. Según los trabajos de revisión de Li et al (2018) y de Ghosh et al (2019, en 2018 sólo existían unas pocas instalaciones a escala completa. La Figura 7 muestra un listado de instalaciones a gran escala con las principales tecnologías disponibles.



Fuente: Ghosh et al (2019)

**Figura 7. Número de instalaciones a gran escala por tecnología disponible en el mundo**

A nivel experimental, la reducción de P, con las tecnologías disponibles, depende de la naturaleza del influente y del pH, pero según la revisión de Zhang et al. (2017) puede variar entre 67 y 98% para influente líquido de estiércol, y entre 74 y el 95% para digestato anaeróbico de estiércol semi-líquido. También a escala experimental Tarragó (2017) diseñó un cristalizador basado en un reactor “air lift” y un sedimentador para determinar el papel de los sólidos en la nucleación de estruvita, así como el efecto de los sólidos en suspensión en las propiedades del producto recuperado, fue desarrollado. Se demostró que las partículas sólidas no solo no inhiben la formación de estruvita, sino que actúan como núcleos que favorecen la aglomeración de cristales de estruvita. La mayoría de las tecnologías de procesamiento de nutrientes del estiércol son complementarias a la digestión anaeróbica, ya sea como tecnologías de pretratamiento que pueden mejorar la producción de biogás, o como tratamientos posteriores, que pueden ayudar a convertir el digestato en productos con propiedades particulares (Tabla 2).

**Tabla 2. Resumen de parámetros relativos a la cristalización experimental de fosfato de amonio y magnesio.**

Muestra	Concentración inicial de fosfato (mg/l)	Razón molar de N, P, and Mg	pH	Tiempo de reacción	Tasa de eliminación de fosfato (%)	Referencia
Agua residual de estiércol	145	16.4:1	8	30 min	67	Le Corre et al 2005
	189,9	1:1:0.8	8,35	4 h	96	Zhang et al 2009
	60,01	63.5:1:1	8,09	4 h	92.8	Suzuki et al 2007
	128	1:1:1.2	9	1 h	98	Muryanto et al 2014
Digestato anaeróbico de agua residual de estiércol	51,1	30.7:1:1.4	8 - 10	1 h	74-95	Jaffer et al 2002
	55.4	9.6:1:1.2	9	20 min	85	Rahaman et al 2014
	64.2	1:1.2:1.2	9	15 h	97	Hutnik et al 2013

Fuente: Zhang et al 2017

#### 4.2.5. CAPACIDADES DISPONIBLES EN RE-LIVE WASTE

El proyecto RE-LIVE WASTE es una red transnacional sobre manejo de desechos de ganado de la agricultura intensiva. Se basa en las experiencias previas y la investigación científica realizada por todos los socios en sus contextos nacionales. Gracias a la implementación de actividades de prueba, los desechos de ganado pueden pasar de ser una desventaja (problema ambiental y costos de manejo) a un recurso valioso para el sector agrario. La evaluación de las acciones piloto permite identificar las fortalezas de las soluciones probadas. RE-LIVE WASTE incluye cuatro plantas piloto a pequeña escala para la precipitación de estruvita por medio de un cristizador de alta eficiencia capaz de realizar efectivamente la recuperación de nitrógeno junto con fósforo. RE-LIVE WASTE se basa en el conocimiento generado por proyectos previos como Ferpode, Wavalue, Metabioresor y Livewaste. Esto facilitará la eliminación de barreras y el establecimiento de un mercado funcional para los fertilizantes orgánicos, contribuyendo a la creación de nuevas empresas y oportunidades de empleo en territorios rurales.

La adquisición de información en España ha sido posible gracias a los socios IMIDA y ALIA que participaron en Metabioresor (proyecto que validó una planta piloto que gestionaba residuos y subproductos procedentes del sector porcino). Durante el diseño del proyecto, los socios recopilaron toda la información disponible sobre el estado del arte, los casos en que se han producido fertilizantes a partir de desechos, los estudios realizados sobre la valorización económica del digestato, etc.

En el caso de RE-LIVE WASTE, un reto adicional es el aprovechamiento de infraestructuras en funcionamiento u obsoletas para integrar la valorización de la estruvita en los procesos de reducción/recuperación de nutrientes.

### 4.3. PROPUESTA DE VALOR

*Se propone la producción de estruvita a partir de la recuperación de estruvita del estiércol y purín con alta concentración de sólidos en suspensión, y adaptable a distintas especificidades geográficas y pretratamientos (separación mecánica de fases sólida-líquida, digestión anaeróbica, etc.). La tecnología debe ser adecuada para explotaciones individuales o para la gestión colectiva de los residuos.*

El análisis de costes e ingresos se realizará con información proporcionada por la empresa porcina murciana con purín de granjas en Castellón, que indica algunos parámetros básicos de la composición de los purines y el volumen de estiércol semi-líquido a ser tratado. Pero el proceso específico no ha sido hasta ahora probado en España. Aquí la tecnología tiene un papel importante, y con base en la experiencia acumulada, el proyecto ha contemplado probar, en la experiencia piloto, la tecnología Sermap®

#### 4.3.1. ASPECTOS LEGALES

El anterior Reglamento europeo sobre abonos (CE nº 2003/2002) no contemplaba la estruvita como fertilizante estándar, como tampoco lo hace la legislación española en el Real Decreto 506/2013. Sin embargo, ya existen propuestas para incorporar la estruvita en el nuevo Reglamento comunitario sobre fertilizantes, como es el caso de los criterios propuestos por la Plataforma Europea de Fósforo Sostenible (ESPP, 2015). En 2019, la Comisión Europea amplió el alcance del Reglamento a productos fertilizantes basados en materias primas secundarias, dando lugar a un nuevo Reglamento UE nº 1009/2019. En el artículo 42 del Reglamento se dispone que la Comisión hará una evaluación para comprobar que estos productos i) no representan un riesgo para la salud humana, animal o vegetal, la seguridad o el medio ambiente, y ii) aseguran una eficacia agronómica.

Las sales de fosfato precipitadas ya se pueden usar legalmente en los Países Bajos, Bélgica, Alemania, Francia, Dinamarca y el Reino Unido. Y estas legislaciones establecen criterios. Como regla general, el material debe cumplir con los valores límite máximos para contaminantes inorgánicos, patógenos biológicos y contenidos mínimos de nutrientes, mientras que algunos países también tienen valores límite máximos para contaminantes orgánicos (HAP, PCDD/F, HCH, aldrina, dieldrina, endrina, isodrina, DDT + DDD + DDE y aceite mineral) en función de la materia seca o el contenido de nutrientes del fertilizante. Además, existe una iniciativa de reconocimiento mutuo transfronterizo para la estruvita entre Países Bajos, Bélgica y Francia (De Clerq et al. 2015).

El Joint Research Centre (JRC), entidad dependiente de la Comisión, publicó recientemente una evaluación específica de los criterios vinculantes que se proponen para la inclusión en el nuevo reglamento de fertilizantes de la estruvita y otros tipos de sales de fosfato precipitadas). La Comisión está elaborando un anexo técnico del Reglamento cuyo análisis se encuentra más allá del alcance de este TFM. El informe del JRC coincide con las recomendaciones de la Plataforma en establecer, para la estruvita pura, un mínimo de contenido en fósforo ( $P_2O_5$ ) en la materia seca (el JRC propone un 16%) o un límite máximo de materia orgánica (la plataforma lo propone en un 2%). Además, los productos fertilizantes de la UE deben cumplir el Reglamento REACH ((CE) No 1907/2006). Este Reglamento aborda la fabricación, uso y comercialización de sustancias químicas y mezclas, y sus posibles impactos tanto en la salud como en el medio ambiente.

Finalmente está la aplicación del principio Fin de Residuo (*end of waste*, FdR) o procedimiento para que una sustancia pueda ser catalogada como subproducto y no como un residuo. A nivel español, se han de cumplir las directrices establecidas en la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Pero no se ha previsto un procedimiento específico para que los particulares puedan solicitar la aplicación del concepto FdR, sino que es el Ministerio quien toma la decisión, mediante una Orden ministerial. Solo se permitirá la exportación del material como subproducto i) en caso de que el país de destino lo acepte como tal; en caso contrario, se exportará como residuo; y ii) aquellas sustancias que se declaren como subproductos cumplan con la normativa específica para productos (ej. REACH, fertilizantes, etc.).

#### 4.3.2. PROCESO SERMAP®

La denominación Sermap® se deriva de la combinación del nombre de la empresa Sereco (socio tecnológico del proyecto RE-LIVE WASTE) y del acrónimo MAP (fosfato de amonio y magnesio). El proceso se describe con detalle en el trabajo de Poletti et al (2012). Se experimentó a escala industrial en una planta de digestión anaeróbica en Perugia. En el experimento de Perugia, las aguas residuales de la laguna de almacenamiento de residuos de tratamiento anaeróbico se transfirieron a un tanque de 24 metros cúbicos y se mezclaron directamente con una solución de 43 por ciento de hexahidrato de cloruro de magnesio, 75 por ciento de ácido fosfórico y solución de soda 30 por ciento. Los reactivos se dosifican mediante un sistema totalmente automatizado, que utiliza un software de control que recibe señales de los sensores electroquímicos de pH y de iones de amonio, así como de la temperatura.

La experimentación indicó que al regular adecuadamente la relación entre las concentraciones de iones de amonio presentes en las aguas residuales y los iones de magnesio y fosfato añadidos es posible obtener una reducción del ion de amonio de más del 79%. La precipitación de estruvita depende de dos factores principales: la relación molar de Mg: NH<sub>4</sub>: P y el valor del pH de las aguas residuales. Para las aguas residuales porcinas, el contenido de Mg es relativamente bajo, por lo que se debe agregar en la cantidad adecuada para precipitar los cristales de estruvita. El cloruro de magnesio (MgCl<sub>2</sub>) suele utilizarse como fuente de Mg debido a su naturaleza disociativa rápida. En cuanto al pH requerido, la aireación es un método que aumenta el pH de las aguas residuales reactivas mediante la eliminación de CO<sub>2</sub>. El efluente del tratamiento tiene un contenido residual de nitrógeno amoniacal que varía entre 200 y 460 ppm, con una DQO entre 1.100 y 1.400. Estos valores permiten completar la eliminación de nitrógeno enviando el efluente a un tratamiento biológico estándar.

La reacción de precipitación produce estruvita en estado fangoso. Al filtrar los fangos en bolsas de drenaje, después de 48 horas de secado se obtiene un material sólido marrón claro. Los análisis realizados indicaron que el MAP seco tiene una composición en la que (además de los componentes básicos, es decir, amonio, fósforo y magnesio) contiene también oligoelementos naturales y sustancia orgánica fácilmente asimilable. Estas características sitúan el MAP como un fertilizante organo-mineral ternario de liberación lenta. El proceso puede modularse para graduar la reducción de nutrientes que se desea lograr sobre la base de la concentración inicial de nitrógeno en los purines, el volumen diario a tratar, la cantidad de fertilizante a producir, la disponibilidad de superficies agrícolas para fertirrigación y los precios de los reactivos empleados.

#### 4.3.3. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO Y DEL PRODUCTO

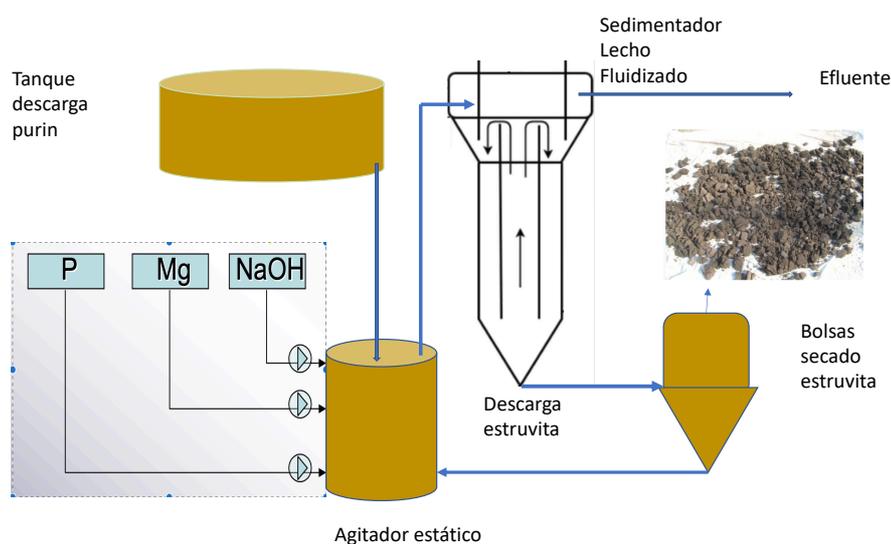
En la fase experimental del trabajo citado, los resultados obtenidos demostraron ser satisfactorios para la reducción de amonio en la fase líquida, para el manejo económico del proceso, para la reproducción de las pruebas y para las propiedades físico-químicas y agronómicas del precipitado obtenido. Se midieron los valores suministrados en un sensor de amonio para las aguas

residuales en la entrada (entrada de  $\text{NH}_4$ ) y después del tratamiento SERMAP® (salida de  $\text{NH}_4$ ) y las reducciones correspondientes. En todos los casos se alcanzaron valores de concentración de  $\text{NH}_4$  inferiores a 500 mg/l. Las reducciones porcentuales se situaron entre 39,9% y 79,2%, a veces sin ningún tratamiento de separación previa sólido-líquida. Así, se obtuvo un efluente del tratamiento MAP con un contenido  $\text{NH}_4$  entre 200 y 460 ppm (promedio 346 ppm) y promedio COD siempre en el rango entre 1.100 y 1.400 ppm.

**Tabla 3. Parámetros de experimentación del proceso SERMAP®**

Razones molares (NH <sub>4</sub> :Mg:PO <sub>4</sub> )	NH <sub>4</sub> influyente mg/l	NH <sub>4</sub> efluente mg/l	Ph	Porcentaje de reducción
1:0,8:0,8	1503	432	9,5	71,3
1:0,7:1	1560	325	9,7	79,2
1:0,7:1	1030	340	9,4	67,0
1:0,7:1	1288	350	9,6	72,8

Fuente: Poletti et al. (2012).



Fuente: Elaboración propia a partir de Poletti et al (2012)

**Figura 8. Proceso SERMAP®**

El producto obtenido se caracteriza por: i) estabilidad, sin peligro de volatilización del nitrógeno y sin emisión de malos olores; ii) alta concentración de nutrientes (N, P y materia orgánica) y presencia de oligoelementos; iii) origen natural; iv) baja volatilidad; v) baja solubilidad; vi) alta biodisponibilidad; y vii) adaptabilidad a otros procesos de gestión de residuos ganaderos.

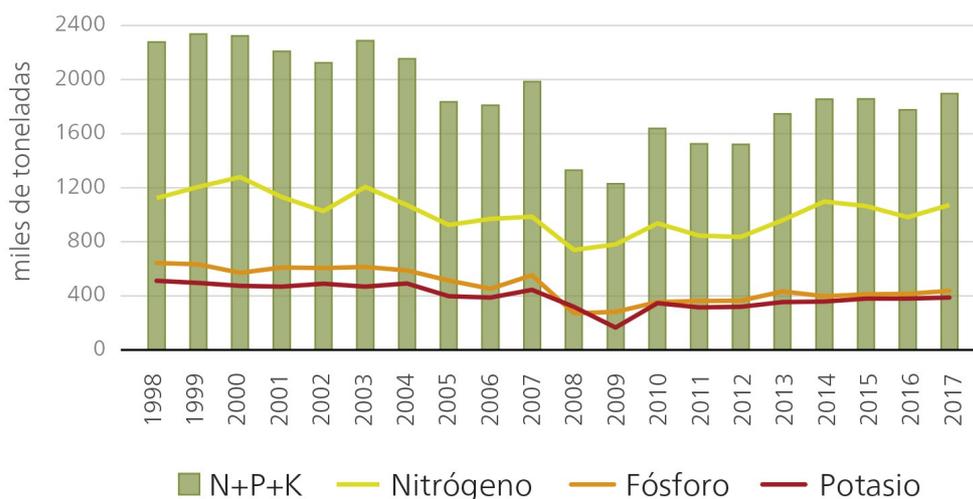
#### 4.3.4. CLIENTES POTENCIALES

Hay varios clientes potenciales del fertilizante:

a) agricultores y cooperativas que trabajan sistemas de producción orgánicos y sostenibles;

b) empresas dedicadas a la industria de la biofertilización que podrían estar interesadas en completar su gama de productos a la venta o incluir la estruvita en la mezcla.

En cuanto a los primeros podemos contemplar no sólo productores de alimentos, sino también jardineros, paisajistas, cultivadores de césped, empresas de cultivos ornamentales y, en menor grado, centros que realizan investigación agronómica. En cualquier caso, la Directiva de Nitratos de la UE y las preocupaciones sobre las emisiones de N y P al suelo y al agua abren una ventana comercial desde un enfoque circular. Aunque el mercado podría desarrollarse internamente en los territorios rurales, el fertilizante producido también podría exportarse fuera de la región productora.



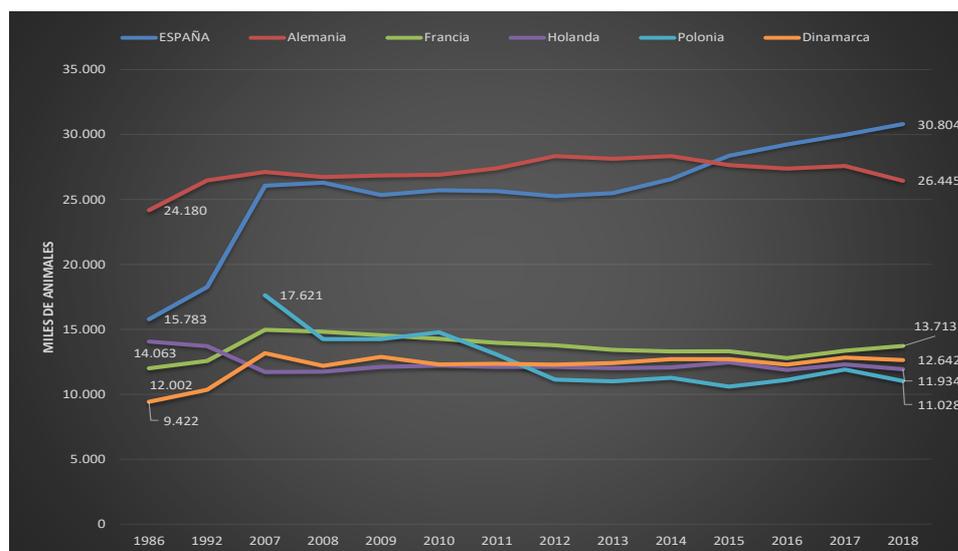
Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

**Figura 9. Consumo de nutrientes en España**

El gasto promedio en fertilización en las explotaciones de la UE oscila entre 1% y 12% de los costes totales (Wijnands y Linders, 2013). Dicho gasto es relativamente alto para las explotaciones productoras de cultivos especializados como las frutas y hortalizas, casi el 12%. En las últimas dos décadas el consumo total de abono ha ido fluctuando con un fuerte retroceso hacia 2008 y una recuperación con tendencia a la estabilización en años recientes. En términos de nutrientes, en 2017, el consumo fue de 1 millón de toneladas de N, 436 mil toneladas de P y 388 mil toneladas de K (Figura 9). Existe una demanda de abonos complejos ternarios y binarios de unos 1,5 millones de toneladas (datos de 2016), siendo la mitad suministrado por importaciones. Como se ha indicado anteriormente, una parte del potencial del consumo puede provenir de agricultores ecológicos. Se trata de un sector en expansión. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación estimó para 2018 una superficie dedicada a la producción ecológica de 2.246.000 hectáreas, que supone casi un 10% de la superficie agraria utilizada española. Según datos del propio Ministerio, esta superficie ha crecido de media un 7 % anual en el último quinquenio.

Una parte de los beneficiarios de la tecnología son los ganaderos, al reducir los costes de gestión de cumplimiento con la normativa ambiental. El sector es consciente de la necesidad de minimizar los aportes de fósforo en las aguas superficiales. Según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2018), se ha dado un descenso del número total de granjas porcinas en los últimos 12 años, aunque esta tendencia se ha limitado a las explotaciones más pequeñas y por tanto se observa una tendencia a la concentración. Aún así, en el último quinquenio la cifra total se encuentra estabilizada alrededor de 85 mil granjas, impulsado por el aumento de la producción de los

últimos años. España ocupa el tercer lugar mundial en población porcina (Figura 10), con un apreciable aumento en el último quinquenio, por delante del registrado en otros países de la UE.



Fuente: EUROSTAT y SG Análisis, Coordinación y Estadística (MAPA).

Elaborado por la SG Producción Ganadera.

**Figura 10. Evolución del censo porcino**

En consecuencia, si algo puede favorecer la búsqueda de estrategias de reducción o recuperación de nutrientes es tanto la evolución del censo (probablemente afectado por una deslocalización de la producción desde el Norte de Europa) como el mismo proceso de reestructuración de las granjas porcinas en nuestro país. El coste de los procesos innovadores hace que sean más aplicables por ganaderos más grandes o cooperativas que deben actuar de manera responsable con respecto a la eliminación de residuos. Las características del purín pueden variar según el tipo de ganado y la fase productiva. Según el manual de gestión de deyecciones ganaderas y fertilizantes nitrogenados, en términos de purín por m<sup>3</sup>/plaza, la generación anual en cerdas puede ser desde 2,5 m<sup>3</sup> en cerdas en reposición hasta 17,75 m<sup>3</sup> en cerdas en ciclo cerrado. Según Münch et al (2001) del fósforo contenido en el estiércol, aproximadamente 21 t/año de estruvita podrían llegarse a producirse para una unidad de 100 cerdas.

#### 4.3.5. ASPECTOS DIFERENCIALES DEL PRODUCTO

La obtención de un nuevo ingrediente para los productos fertilizantes estimulará la innovación para desarrollar formulaciones de liberación de nutrientes en fertilizantes P solubles en agua convencionales o mediante la combinación de la estruvita con otros materiales componentes en un solo producto (p. ej., como aditivo para el compost).

La aprobación legal de la estruvita promoverá una mayor competencia entre los fabricantes de fertilizantes y las empresas de mezclas de fertilizantes con posibles efectos en los precios de compra de los materiales fertilizantes por parte de los agricultores. Finalmente, la producción de fertilizantes a partir de materias primas secundarias producidas localmente en Europa reducirá la susceptibilidad del sector agronómico europeo a la volatilidad de los precios de los fertilizantes debido a las posibles tensiones geopolíticas exteriores y al agotamiento de rocas de fosfato de alta calidad fácilmente disponibles.

Además del contenido total de P, su solubilidad proporciona una indicación del P disponible en los fertilizantes. La materia prima para la producción de la mayoría de los fertilizantes minerales P es la apatita que está presente como roca de fosfato en la naturaleza. Este material puede usarse directamente como fertilizante, pero debido a su baja solubilidad el P disponible para la planta es bajo. Al triturar, calentar y acidular la roca, se puede aumentar la solubilidad del P. Según de Vries et al (2017) este principio se aplica en la producción de fertilizantes minerales P altamente solubles modernos como el fosfato de mono calcio (por ejemplo, en SSP y TSP) o el fosfato de amonio (en MAP y DAP).

**Tabla 4. Fertilizantes con contenidos de N, P, K, Ca, Mg y S, expresados como gramos de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, KO, CaO, MgO y SO<sub>3</sub> por 100 gramos de fertilizante.**

Fertilizante	Abreviatura	Compuesto	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	KO	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
Mono fosfato de amonio	MAP	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	12	54	0	0	0	0
Di fosfato de amonio	DAP	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> H PO <sub>4</sub>	18	46	0	0	0,8	0,8
Superfosfato simple	SSP	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> . H <sub>2</sub> O + CaSO <sub>4</sub>	0	20	0	34	0	31
Estruvita amónica		Mg NH <sub>4</sub> PO <sub>4</sub> .6 H <sub>2</sub> O	5,7	28,9	0	0	16	0
Súper fosfato triple	TSP	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	0	45	0	24	0	4,5
K-Estruvita		MgK PO <sub>4</sub> .6 H <sub>2</sub> O	0	26,7	17	0	15	0
Fosfato de roca blanda		Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0	27	0	37	0	0

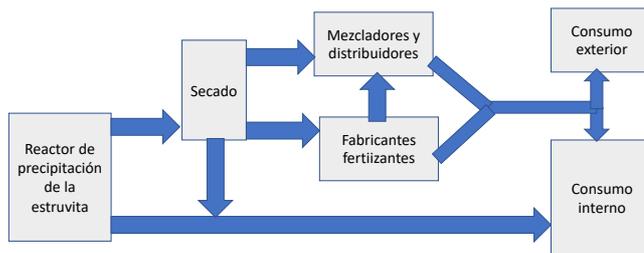
Fuente : De Vries et al. (2017), p. 12

La estruvita no es muy soluble en agua, pero lo es más en suelos ácidos, en contraste con los fertilizantes de P ordinarios basados en fosfato de calcio (por ejemplo, superfosfato simple) y fosfato de amonio (por ejemplo, di-fosfato de amonio). Debido a esto, a menudo se concluye que la disponibilidad de P de la estruvita a corto plazo es menor que la de los fertilizantes P ordinarios y, a veces, se afirma que podría caracterizarse como un fertilizante P de liberación lenta. Algunos trabajos comparan el rendimiento del cultivo y/o la absorción de P de la estruvita con el rendimiento y/o la absorción de P de otros fertilizantes de P. En comparación con el TSP y el di-fosfato de amonio, la estruvita comportó cantidades comparables de P absorbidas por las plantas para pH entre 6 y 6,5 (Achat et al., 2014; Massey et al., 2009). Talboys et al. (2016) también realizaron experimentos con estruvita molida y granulada y concluyeron que la estruvita granulada se comportó como un

fertilizante de liberación lenta, ya que condujo a una menor absorción de P por el trigo de primavera durante la fase temprana de crecimiento. Otros estudios llegaron a la conclusión de que, en condiciones ligeramente ácidas, la solubilidad de la estruvita era lo suficientemente alta como para proporcionar P suficiente a los cultivos herbáceos (Achat et al., 2014).

#### 4.3.6. CANALES Y CADENA DE VALOR

La comercialización del fertilizante puede seguir varios enfoques dentro del esquema de cadena de valor mostrado en la Figura 11.



Fuente: Elaboración propia tras consulta a Focus Group

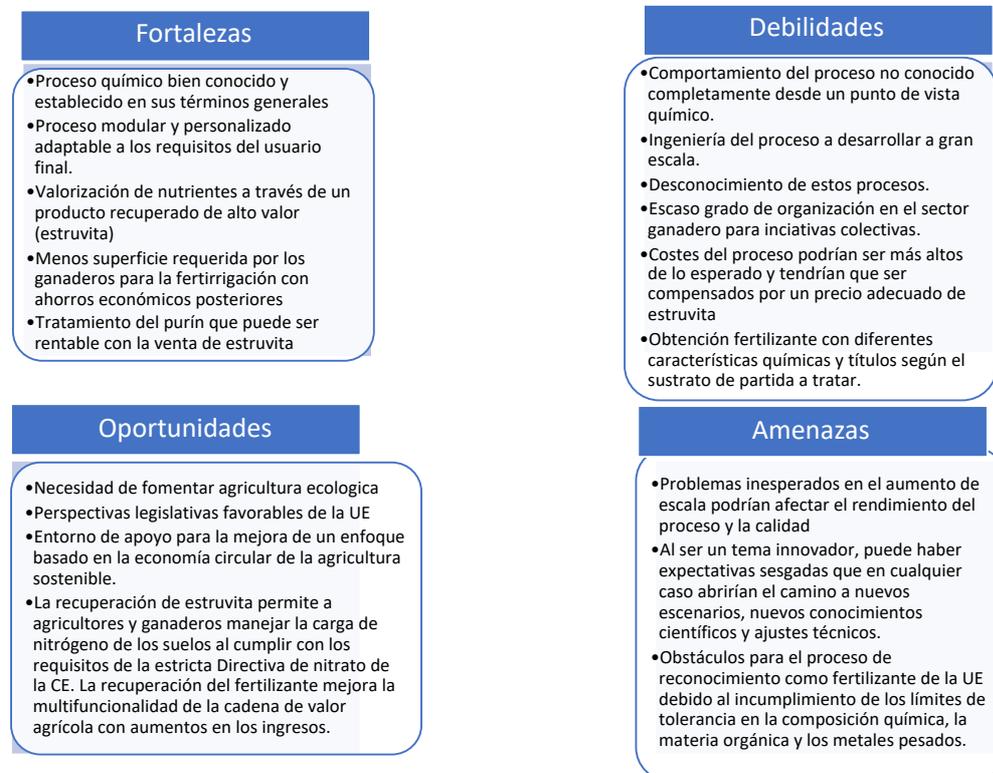
**Figura 11. Cadena de Valor estruvita**

Normalmente la precipitación y el secado los llevará a cabo la misma empresa, aunque podrían ser procesos separados (por ejemplo, que hubiera una planta centralizada de empacado). En nuestro caso, ambos procesos se situarían en la misma instalación. Desde la instalación de producción y/o secado y cumpliendo los criterios de componente de fertilizante marcado-UE (no residuo), el producto podría ser comercializado en el mercado interior. Alternativamente, y quizás lo más normal, es que sea comercializado a empresas mezcladoras o fabricantes de fertilizantes, como residuo, subproducto o bajo los criterios FdR nacionales. A veces todos los agentes involucrados podrían ser de la misma compañía, aunque en nuestro caso estamos pensando en una empresa ganadera o asociación de ganaderos. Por ejemplo, una empresa podría actuar como proveedora de la materia prima a sus propios sitios de fabricación, y vendería sus propios productos a través de su propio sistema de distribución, incluida la prestación de servicios a los agricultores como muestreo de suelo, análisis agronómico y, en algunos casos, la aplicación directa al campo. Las empresas tendrán diversos grados de integración a lo largo de la cadena de valor. Cuando se mira en el mercado europeo en concreto, la organización más común consistiría en una separación entre los fabricantes de fertilizantes y los distribuidores/importadores, que a su vez son en muchos casos las compañías de los propios mezcladores.

En términos generales, los materiales comercializados a la salida de la planta de precipitación-secado se considerarán una materia prima para su posterior procesamiento, por ejemplo, en forma de mezclas a granel (para mezcladores) o compuestos físicos de NPK (para fabricantes de fertilizantes). También se practica la aplicación directa de productos comercializados, pero las mezclas y los compuestos representarán la mayor parte de la aplicación real al suelo. Los fertilizantes P vendidos a sectores específicos (por ejemplo, el uso de fertilizantes en aplicaciones hortícolas, jardinería

doméstica y medios de cultivo) pueden estar asociados con precios de venta más altos, pero tales ajustes de precios no están cubiertos en este documento.

#### 4.3.7. ANÁLISIS DAFO



Fuente: elaboración de la autora a partir de entrevistas a miembros de RE-LIVE WASTE.

Figura 12. Análisis DAFO de la producción de un nuevo fertilizante orgánico

#### 4.3.8. COSTES

En la Tabla 5 mostramos un posible análisis económico del tratamiento de purín líquido, en dos escenarios. El primero con un influente de 20 m<sup>3</sup> diarios (Escenario A) y el segundo con un influente de 50 m<sup>3</sup> diarios (Escenario B). El primero asume que gestiona la mitad del purín líquido generado en el caso de la empresa presentada en el capítulo anterior, mientras que la segunda instalación podría incorporar un flujo adicional proveniente de otras explotaciones ganaderas. En ambos escenarios, se plantea un porcentaje de reducción de NH<sub>4</sub> superior al 40%. En el escenario A se plantea un coste de inversión de unos 64,000 euros (basado en el proyecto piloto del próximo capítulo), y en el escenario B el coste aumentaría a 100,000 euros que es lo previsto para una entrada de 50 m<sup>3</sup> según la empresa SERECO que implanta la tecnología SERMAP®.

**Tabla 5. Análisis económico de una instalación de precipitación de estruvita**

Concepto	Unidades	A: instalación par 20 m3 diarios			B: instalación Para 50 m <sub>3</sub> diarios		
		Precio o tasa unitaria €/ud, %	Cantidad	Valor €/año	Precio o tasa unitaria €/ud o %	Cantidad	Valor €/año
Coste de capital (amortización anual al 4,3 % de interés en 7 años)							
Materiales y equipos		16,85%	9.000	1.517	16,85%	14.063	2.370
Construcción, instalación		16,85%	55.000	9.267	16,85%	85.937	14.480
Subtotal	€		64.000	10.784		100.000	16.850
	€/m <sup>3</sup>			1,80			1,12
Costes operativos							
Reagentes	m <sub>3</sub>	5,74 €/m <sup>3</sup>	6.000	34.440	4,02 €/m <sup>3</sup>	15000	60.270
Mano de Obra	horas	13	600	7.800	13	1500	19.500
Gestión	horas	45	52	2.340	45	52	2.340
Electricidad	Kwh	0,09	18.000	1.620	0,09	45000	4.050
Mant.(5% coste capital)	€	5%	64.000	3.200	5%	100000	5.000
Subtotal	€			49.400			91.160
	€/m <sup>3</sup>			8,23			6,08
Costes totales	€			60.184			108.010
	€/m <sup>3</sup>			10,03			7,20
Ingresos (17 Kg de estruvita/m <sup>3</sup> )							
C: estruvita 150 €/kg	t	150	102	15.300		255	38.250
D: estruvita 350 €/ kg	t	350	102	35.700		255	89.250
Coste total neto							
C: estruvita 150 €/kg	€			44.884			69.760
	€/m <sup>3</sup>			7,5			4,7
D: estruvita 350 €/kg	€			24.484			18.760
	€/m <sup>3</sup>			4,1			1,3
Coste neto de gestión							
C: estruvita 150 €/kg	€			34.100			52.910
	€/m <sup>3</sup>			5,7			3,5
D: estruvita 350 €/kg	€			13.700			1.910
	€/m <sup>3</sup>			2,3			0,1

El plazo de amortización de las instalaciones se asume en 7 años con un 4,3 % de tipo de interés a empresas industriales (Créditos ICO, 2019), dando lugar a un coste anual del capital de 10.784 euros en el escenario A y de 16.850 euros en el escenario B. Se asume que las instalaciones operan 300 días al año. Debemos considerar además otros gastos, como mano de obra, que se asume en el escenario A, que dedica 2 horas diarias al funcionamiento de la planta y 1 hora a la semana (por todas las semanas del año) a la gestión/administración de las instalaciones. La mano de obra dedicada al funcionamiento de la planta se estima que se multiplica por 2,5 en la instalación del escenario B, aunque podría haber una reducción por economía de escala que no asumimos en este ejercicio. En conjunto, el tiempo de trabajo para el funcionamiento de la instalación se dedica a i) supervisar la entrada de purín; ii) retirar el producto obtenido; iii) supervisar y operar el sistema, incluyendo el secado y el depósito; iv) preparar la dosificación de reagentes; v) realizar reparaciones menores.

En cuanto al coste energético, se estima que la planta del escenario A consume unos 60 Kw.h por día (datos de la planta experimental diseñada para una entrada de 20 m<sup>3</sup>), consumo que se multiplica por 2,5 en la planta del escenario B (1620 y 4050 euros al año, en los escenarios A y B, respectivamente; Flotats et al. 2011 indican entre 500 y 1000 €/año para una planta que procesa para estruvita unos 10 m<sup>3</sup>/día de purín). En cuanto a los costes de productos químicos por m<sup>3</sup> se estima un valor medio entre los dos valores aportados por Poletti et al. (2012) para supuestos experimentales con influentes con porcentaje de NH<sub>4</sub> superior a los 1,500 mg/l (5,10 y 6,3 €/m<sup>3</sup>). Se asume, de todos modos, según la empresa Sereco, socia de RE-LIVE WASTE, que es posible reducir un 30% los costes de los reagentes mediante negociación de contratos de suministro, lo que asumimos para el escenario B. De todos modos, vemos en la Tabla 5 que los reagentes suponen casi el 70% de los costes operativos en el Escenario A y del 66% en el Escenario B.

En resumen, los mayores costes de ambos escenarios son por amortización (depreciación e intereses sobre el capital invertido) (18 y 16 por ciento, respectivamente), mano de obra y administración (17 y 20 por ciento), productos químicos (57 y 56 por ciento) y consumo eléctrico (3 y 4 por ciento). Se obtendrían, unos costes de gestión de 6,08 €/m<sup>3</sup> (escenario B) y 8,23 €/m<sup>3</sup> (escenario A). Son unos costes relativamente elevados, que sólo se compensan parcialmente por la puesta en valor de la estruvita precipitada, en el lado de los ingresos.

#### 4.3.9. INGRESOS

El valor de la estruvita variará dependiendo de los costes de los fertilizantes y los nichos de mercado para la estruvita, como la fertilización del césped. El trabajo de Li et al (2019) contempla precios entre 300 y 800 USD/t. Westerman et al. (2010) considera 330 USD/kg. Los expertos de Sereco plantean una valoración entre 200 y 400 euros/t. El precio obtenido en el modelo de negocio de estruvita dependerá del grado de pureza en este precipitado del fertilizante sólido obtenido. Hay que advertir que los volúmenes de estruvita en el mercado interno de fertilizantes son muy bajos y se entregan principalmente a nichos específicos del mercado agrícola, dependiendo del marco legal en cada Estado miembro. Por lo tanto, es imposible proporcionar una evolución de los precios de venta de un determinado producto fertilizante que contenga materiales recuperados en la UE observado para determinar los principales factores que afectan los precios de la estruvita y su importancia relativa.

Primas adicionales de precios podrían aplicarse a materiales con bajo contenido de metales / metaloides, principalmente sales y derivados de fosfato precipitados. Según la evaluación del JRC, el uso de sales y derivados de fosfato precipitados en mezclas de fertilizantes podría reducir el contenido de Cd en los fertilizantes P o la dependencia de rocas de fosfato caras con bajo contenido de Cd. Los nutrientes suplementarios en la estruvita se valoran para los fertilizantes listos para la venta y las materias primas para los compuestos secundarios utilizados por los mezcladores que podrían

monetizar completamente los valores de nutrientes en la formulación. Así, el Mg está valorado en 130 euros/t, lo que agrega un valor adicional. Nuestros supuestos de ingresos consideran dos escenarios de valoración de la estruvita, que son algo menores al intervalo aproximado por Sereco. Así, el escenario C valora el Kg a 150 euros, mientras que el escenario D lo hace a 350 euros. Debemos considerar, además el posible aprovechamiento del efluente del proceso que podría ser utilizado para fertirrigación, si cumpliera los niveles de nitrógeno exigidos por la Directiva de nitratos. Aunque este ingreso no está contemplado en la Tabla 5, podría obtenerse quizás hasta 0,40 €/m<sup>3</sup> según los expertos consultados. Sin contar estos ingresos, los coste netos de tratamiento se situarían entre 0,1 €/m<sup>3</sup> en el escenario más favorable y 5,7 €/m<sup>3</sup> en el más desfavorable.

#### 4.3.10. LEAN CANVAS

<p><b>2. Problemas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesidad de sustituir fertilizantes basados en fosfatos minerales de roca.</li> <li>- Altos niveles de N y P generados por la ganadería en zonas de alta densidad, que incumplen la normativa ambiental.</li> <li>- Alta solubilidad de las mezclas de fertilizantes fosfatados <u>con</u> <u>pérdida</u> de eficiencia y problemas de contaminación de suelo y acuíferos.</li> </ul>	<p><b>4. Solución</b></p> <p>Producto:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- estable, con baja solubilidad, sin peligro de volatilización del nitrógeno y sin emisión de malos olores;</li> <li>- alta biodisponibilidad, con alta concentración de nutrientes y presencia de oligoelementos;</li> <li>- capaz de ser combinados con otros procesos de gestión de residuos ganaderos.</li> </ul>	<p><b>3. Proposición Única de Valor</b></p> <p>Sistema de producción de <u>estruvita</u> fertilizantes obtenido a partir de la recuperación de N y P del purín, adaptable a distintas especificidades geográficas y pretratamiento. Tecnología adecuada para explotaciones individuales o para la gestión colectiva de las deyecciones ganaderas.</p>	<p><b>9. Ventaja diferencial</b></p> <p>Valorización de nutrientes a través de un producto recuperado. Fertilizante de liberación lenta de P adaptable a las necesidades del usuario final. Reducción de los costes de gestión del purín que puede llegar a ser rentable con la venta de <u>estruvita</u>. La recuperación de <u>estruvita</u> permite a agricultores y ganaderos manejar la carga de nitrógeno de los suelos al cumplir con los requisitos de la estricta Directiva de nitrato de la CE.</p>	<p><b>1. Segmentos de Clientes</b></p> <p>Agricultores interesados en fertilizantes ternarios eficaces ricos en fósforo, de liberación lenta.</p> <p>Ganaderos interesados en gestionar residuos recuperando nutrientes y así cumplir las normativas ambientales.</p>
	<p><b>8. Métricas clave</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Volumen y composición de influente tratado.</li> <li>- Razones molares de los productos químicos utilizados</li> <li>- <u>Pb</u></li> <li>- Porcentaje de reducción de NH4</li> <li>- Kg de <u>estruvita</u> por m3 tratados</li> <li>- Precio de la <u>estruvita</u></li> <li>- Presencia de metales pesados en el producto</li> <li>- Porcentaje de N y P en efluente.</li> <li>- Consumo de energía eléctrica</li> <li>- Huella de carbono</li> </ul>		<p><b>5. Canales</b></p> <p>Tras la reforma legal que posibilite la comercialización de la <u>estruvita</u>, los materiales comercializados a la salida de la planta se considerarán normalmente una materia prima para su posterior procesamiento o mezcla. No se descarta, vender <u>estruvita</u> a través de un sistema propio sistema de distribución.</p>	
<p><b>7. Estructura de Costes</b></p> <p>Depreciación e intereses sobre el capital invertido: 16 – 18 por ciento          Mano de obra y administración: 17 y 20 por ciento          Productos <u>químicos</u>: 56 - 57 por ciento          Consumo eléctrico: 3 - 4 por ciento.</p> <p>Costes de gestión 6,08 €/m3 y 8,23 €/m3 para flujos de entrada de 20 y 50 m3/día.          Puede haber economías de escala para instalaciones mayores</p>		<p><b>8. Flujos de Ingresos</b></p> <p>Se consideran dos escenarios de valoración de la <u>estruvita</u>, 150 euros/kg y 350 euros/kg. Los volúmenes de <u>estruvita</u> en el mercado interno de fertilizantes son muy bajos y se entregan principalmente a nichos específicos del mercado agrícola interno, dependiendo del marco legal en cada Estado miembro.</p> <p>El efluente del proceso que podría ser utilizado para <u>fertilización</u>. Como proyecto innovador, se pueden organizar actividades de formación que pueden generar algún ingreso.</p>		

Figura 13. Lean Canvas y Propuesta de Valor

## 4.4. PROYECTO PILOTO

### 4.4.1. BASES DEL PROYECTO

Tras la fase de formulación de una propuesta única de valor, es necesario plantear un prototipo o proyecto piloto que permita contrastar la viabilidad del modelo de negocio.

En colaboración con la Generalitat Valenciana y la Fundación Global Nature, La Unió puso en marcha una pequeña planta piloto en Segorbe (Catellón) donde trata el purín para obtener la estruvita necesaria para realizar ensayos agronómicos y estudios de mercado. También se colaborará activamente en la difusión de la tecnología y sus resultados a grupos de agricultores, ganaderos, empresarios y administraciones públicas. Lo interesante de esta planta es que aprovecha una infraestructura existente, cuyo uso era muy limitado. Se solicitó a la Consellería de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica la cesión de un espacio donde implementar el piloto realizando mejoras en planta existente, en unas instalaciones del IVIA en Segorbe. La construcción y el funcionamiento de la planta piloto fue sufragada dentro del proyecto aprobado y su coste corresponde a la planta de una capacidad máxima de 20 m<sup>3</sup> de purines diarios, que contemplamos en el análisis económico del capítulo anterior.

En realidad, el proyecto piloto demostrativo se puede resumir en:

- ✓ 300 m<sup>2</sup> en total
- ✓ Tratamiento total de 100 m<sup>3</sup> de purines
- ✓ 6 meses máximo de funcionamiento
- ✓ Consumo estimado de 60 kWh /día

La intención de La Unió, promotora de esta planta experimental, fue la de sólo utilizar los meses necesarios para producir la estruvita necesaria para una prueba piloto del proyecto, probando con diferentes tipos de purines para intentar encontrar más soluciones y posibilidades. La planta piloto se instaló finalmente en el "Centro de Tecnología Animal-CITA-IVIA" ubicado en Segorbe, Castellón, Comunidad Valenciana (España).

En el centro de investigación ya existen pequeñas unidades de producción ganadera (cerdos de ciclo cerrado, aves de corral, conejos, etc.) para llevar a cabo actividades experimentales y de investigación. También hay una planta experimental para el tratamiento y purificación del purín de la granja de cerdos que consiste en tanques de almacenamiento y sistemas de separación de aguas residuales con filtros de prensa y centrifugación. La planta experimental para la producción de estruvita orgánica se insertó en la planta antes mencionada y utiliza algunos dispositivos que ya estaban en funcionamiento o que han sido restaurados funcionalmente en el marco del proyecto RE-LIVE WASTE.

El proyecto consiste en la ejecución de pruebas experimentales para obtener O-SEP (Precipitado Enriquecido de Estruvita Orgánica) a partir de varios tipos de influentes iniciales. Así, se realizará un ciclo de pruebas con el estiércol de cerdo producido por las granjas presentes en el centro experimental, mientras que otro ciclo de pruebas se realizará con el purín de cerdo centrifugado obtenido recurriendo a un separador centrífugo innovador instalado en la empresa murciana a la que nos referimos anteriormente. El purín pre-tratado (aproximadamente 20 m<sup>3</sup>) se transportará con camiones cisterna apropiados autorizados para el transporte de aguas residuales y se almacenará en las instalaciones de prueba de Segorbe en tanques especiales de 1 metro cúbico de capacidad para permitir su almacenamiento y uso en condiciones de bioseguridad. Para ser viable, el proceso debe ser válido para varias alternativas de influentes orgánicos, de modo que pueda poner en valor distintos subproductos de la zona.

#### 4.4.2. ORGANIZACIÓN FUNCIONAL DEL PROYECTO PILOTO

La Figura 14 muestra las instalaciones de separación presentes antes del inicio del proyecto, con los depósitos de almacenamiento del purín bruto y purín centrifugado; y la Figura 15 el emplazamiento donde el área de la planta está representada por un rectángulo gris.



Fuente: Proyecto RE-LIVE WASTE



Fuente: Foto aérea del Proyecto RE-LIVE WASTE

**Figura 14. Planta en Segorbe antes de la instalación piloto (en la explanada)**

**Figura 15. Localización de la planta**

La planta piloto que se ha instalado en el centro CITA-IVIA es un sistema de tratamiento de desamonificación modular del digestato procedente de la granja murciana, donde se realiza un pretratamiento, seguido de un proceso de precipitación-sedimentación destinado a recuperar O-SEP. El purín producido por el propio CITA, así como otros posibles subproductos orgánicos también serán sometidos al mismo proceso de tratamiento. Los principios del proceso concebido se resumen esquemáticamente en la Figura 16. A continuación, se incluye una descripción funcional de las unidades de proceso utilizadas con indicación de algunas características de rendimiento de las unidades electromecánicas. La descripción más detallada del proceso, sobre todo la dimensional, no se incluye en este documento, pero forma parte de la documentación del proyecto RE-LIVE WASTE en Segorbe.

**Tabla 6. Descripción del proceso en la planta piloto**

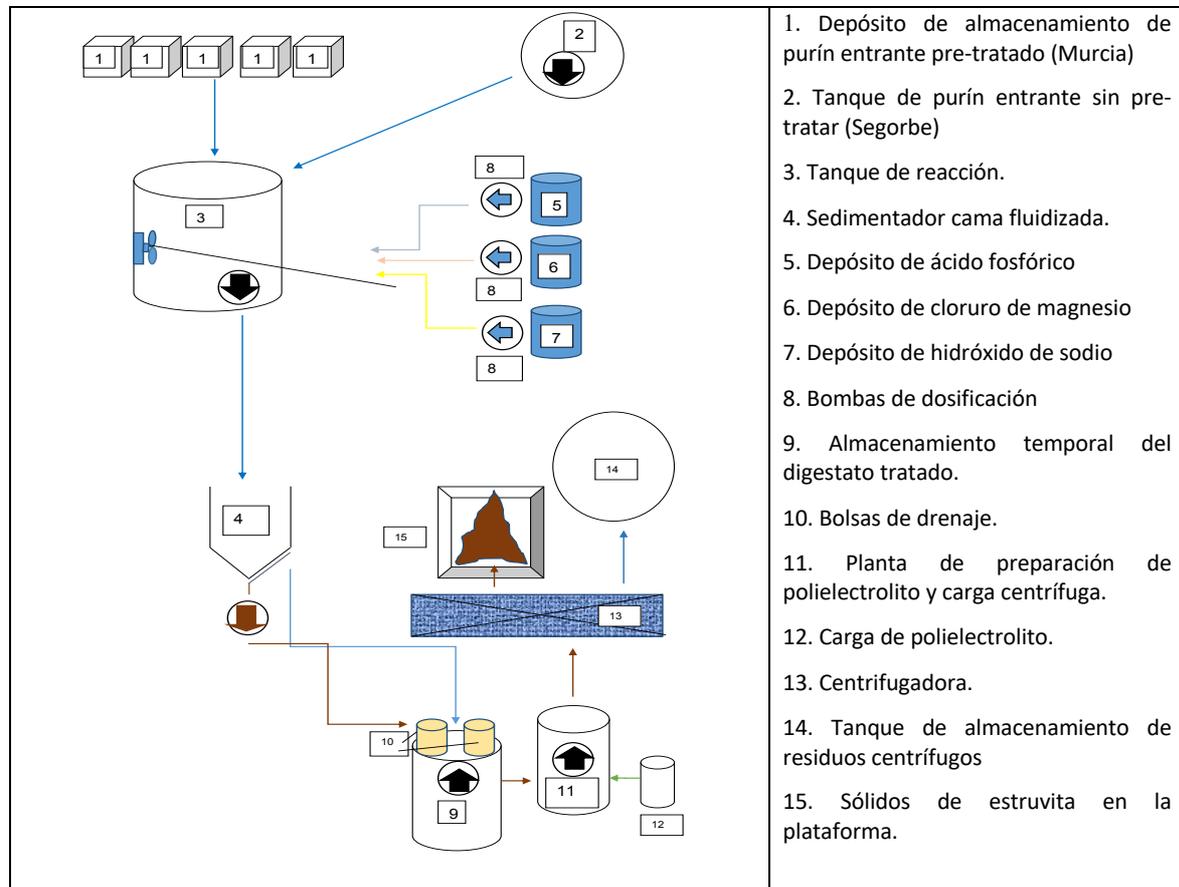
Etapa del proceso	Descripción (Ver Figura 16).
I. Almacenamiento de estiércol influente a través de tanques pequeños y seguros.	El purín pre-tratado procedente de Murcia es transportado por camión tanque equipado con una bomba y los dispositivos de seguridad necesarios. Por medio de la bomba suministrada, la suspensión se carga en depósitos de 1 m <sup>3</sup> (ver 1 en la Figura 16) desde donde la suspensión se transfiere a la unidad de pretratamiento y reacción. El proyecto contempla que puede haber otras procedencias del purín y otros productos orgánicos que tendrán que ser almacenados adecuadamente.
II. Pretratamiento (stripping), reacción, crecimiento de	El pretratamiento consiste en la extracción de CO <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub> operada en un tanque de planta circular en acero inoxidable (nº 3 en la Figura). El tratamiento se realiza mediante agitación mediante un mezclador sumergible de eje vertical equipado con motor eléctrico. La suspensión desgasificada se somete a una reacción de

cristales y maduración	precipitación a través de la dosificación de los productos químicos, cuya cantidad y velocidad de suministro se establecen en función del valor de amonio (medidor móvil) y del pH (sensor fijado en el tanque). Una vez que la reacción alcanza la etapa en la que se produce la formación de los núcleos cristalinos por sobresaturación, la carga por lotes de la suspensión resultante de la reacción de precipitación a la unidad de sedimentación se realiza recurriendo a una bomba sumergible.
III. Sedimentación/precipitación de O-SEP	El sedimentador de lecho fluidizado está compuesto por un cilindro cónico truncado de acero inoxidable o de FRP (resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio). El sedimentador (nº 4 en la Figura) se divide en tres secciones: a) Una parte interna representada por un cilindro vertical fijado con soportes a las paredes de la cubierta externa. La tubería está abierta por arriba y por abajo; b) un cilindro externo en acero o FRP. Fuera del cilindro hay un canal circular con una pendiente de 3° en la dirección de la tubería de drenaje equipada con un vertedero; c) un fondo cónico truncado que tiene una pared externa con una resistencia de 60° con respecto al eje horizontal. La salida inferior está conectada a una bomba mohno.
IV. Almacenamiento temporal de la suspensión tratada (efluente líquido)	El efluente de la precipitación de estruvita tratado se descarga por gravedad, a través de una tubería en el depósito nº 9 de la Figura. Un sensor de amonio móvil medirá la concentración de NH <sub>4</sub> y evaluará directamente la eficiencia del proceso. El efluente se envía con una bomba sumergida a a) un depósito de almacenamiento ya en uso en la planta para la recolección y dispersión de líquidos tratados mediante conexión hidráulica con tuberías ya existentes o b) al tanque de pretratamiento para recirculación.
V. Depósito para la preparación con polielectrolito del O-SEP antes de la centrifugación.	Una bomba mohno es conectada hidráulicamente al fondo del sedimentador con un tubo corrugado flexible que alimenta a) un tanque de preparación de polielectrolitos ("tanque de homogeneización y carga centrífuga") o, como alternativa, b) un sistema de filtrado con bolsas de drenaje colocadas sobre el depósito del apartado anterior. El tanque de preparación de polielectrolitos nº 11 es donde se lleva a cabo la homogeneización y la dilución del precipitado y está conectado hidráulicamente a una estación de separación centrífuga por medio de una bomba sumergida o mohno.
VI. Deshidratación de O-SEP mediante separador centrífugo.	El separador centrífugo ya presente y en funcionamiento es un modelo "Pieralisi baby" (nº 13 en la Figura). Debajo de la centrífuga, hay un carrito para la recolección del sólido que contiene estruvita.
VII. Bolsas de drenaje	El sistema de filtrado de lodos, ubicado sobre el tanque nº 9, está compuesto por bolsas de drenaje de polipropileno alojadas en una estructura de soporte de metal que descansa sobre una rejilla especial. Las bolsas con el O-SEP deshidratado se eliminarán manualmente y se almacenarán de manera adecuada. El drenaje de las bolsas de filtro cae a través de la rejilla en el tanque subyacente nº 9.
VIII. Estación de dosificación de reactivos	Los reactivos necesarios para la reacción de precipitación se almacenan en pequeños depósitos (nº 5, 6 y 7) que se sitúan en el área de dosificación de reactivos debajo del techo ya existente y en una plataforma de hormigón. Los reactivos que se utilizan son: - Ácido fosfórico (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ), con una pureza promedio del 73%; - Cloruro de magnesio (MgCl <sub>2</sub> ) con una pureza promedio del 47%; - Hidróxido de sodio (NaOH), grado mínimo de pureza del 30%. Todos los reactivos anteriores se suministran en formulación líquida. Se conecta a cada cisterna una bomba dosificadora con ajuste de flujo manual e indicación del caudal en una escala analógica serigrafiada. El caudal oscilará entre 130 y 2200 l / h según las condiciones de prueba.

**Tabla 7. Composición química promedio del influente de la planta piloto**

Parámetro	Purin bruto	Purin pre-tratado
Ph (upH)	7,2	7,7
C.E. (dS/m)	22,5	17,5
S.T.S. sólidos en suspensión (g/l)	20	12
M.S. materia seca (g/l)	150	6
T.S. sólidos totales (g/l)	20	12
DBO <sub>5</sub> (g/l)	15	4
DQO (g/l)	87	50
Nitrógeno Orgánico (NTK) (g/l)	2,6	2
Nitrógeno Amonio (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) (g/l)	2	1,7
P Total (mg/l)	0,3	0,1
Ca (mg/l)	280	120
Mg (mg/l)	290	195
K (mg/l)	1800	1750
Na (mg/l)	1250	1200
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	320	165

Fuente: datos proporcionados por la empresa de Murcia (proyecto RE-LIVE WASTE )



**Figura 16. Descripción del proceso**

#### 4.4.3. REDUCCIÓN Y RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES

Teniendo esto en cuenta los datos de composición del influente (Tabla 8), el proyecto RE-LIVE WASTE formuló las hipótesis para los ensayos de prueba con un intento de reducción de nitrógeno en el orden entre 35 y 75%. A partir de experiencias análogas (ver capítulo anterior y Poletti et al, 2012) y de la experiencia en previa en Cerdeña (aunque en este caso se trataba de efluente de digestato anaeróbico), se planteó como hipótesis de partida una producción de O-SEP en el orden entre 36 y 64 kg de SEP por kg de  $\text{NH}_4$  disminuido. Mediante la hipótesis del tratamiento diario de un lote de 3  $\text{m}^3$ , la cantidad esperada de SEP seca obtenida puede variar razonablemente entre 81 kg y 173 kg dependiendo de la tasa de reducción de  $\text{NH}_4$  alcanzable. Se estima que el coste diario promedio para el consumo de reactivos debe oscilar entre 29 y 64 € por cada lote de 3  $\text{m}^3$ . Todos estos datos mencionados anteriormente deben considerarse meramente como supuestos de partida y solo pueden confirmarse tras un número suficiente de ensayos.

#### 4.4.4. PRIMEROS ENSAYOS

Tras la instalación de la planta, la inspección final y las pruebas de aceptación, y después de asegurarse de que las conexiones eléctricas e hidráulicas está instaladas de acuerdo con las especificaciones del proyecto, en enero de 2020 la planta experimental quedó lista para las primeras pruebas (ver los tanques de proceso en la Figura 17). El proyecto RE-LIVE WASTE realizó, a mediados de enero, un taller de capacitación coordinado por Sereco donde se discutieron las ventajas del proyecto y cómo abordar el proceso de precipitación de O-SEP. El equipo local del proyecto RE-LIVE WASTE supervisa el proceso operando directamente en la planta de prueba o recolectando datos en estricta cooperación con el puesto de control remoto. El personal técnico de Sereco, el socio tecnológico del proyecto, está a disposición del personal local también mediante intervenciones directas en el sitio si es necesario. La información que se transmite al puesto de control permite retroalimentar la operación de la planta modificando condiciones experimentales específicas (por ejemplo, con respecto a la dosificación de reactivos, caudales, cargas, pre-despojo, tiempo de retención de licor y demás).

En febrero de 2020 se realizaron unos primeros análisis cuyo objetivo fue determinar la eficacia en reducción de nutrientes y las características del fertilizante sólido obtenido. Los análisis se están llevando a cabo preferiblemente en un laboratorio local, bajo la supervisión de la Fundación Global Nature. El resultado de los experimentos tiene en cuenta las características químicas tanto de la fase líquida como de la fase sólida, es decir, respectivamente, el material de entrada que se mejorará ambientalmente (por ejemplo, el efluente pueda ser interesante para fertirrigación de acuerdo con las disposiciones de la Directiva de nitratos) y O-SEP pueda considerarse un fertilizante valioso. Los parámetros clave de la fase líquida para resaltar y verificar a fondo serán: N total; amonio; nitratos; nitritos; P total; ortofosfatos; magnesio; calcio; potasio. Los parámetros clave de las fases sólida que se resaltarán y comprobarán a fondo serán: N total; P total; calcio; análisis cristalográfico (% de estruvita).

Las primeras pruebas consistieron en realizar la reacción en el tanque correspondiente y la separación de la suspensión tratada (con un contenido de humedad importante, del 98,5%) mediante centrifugación entre las fases líquida y sólida. Las muestras de suspensión tratada (Figura 18) se sometieron a un proceso de centrifugado con el fin de separar las dos fases que componen el producto. Una vez separadas se retira el sobrenadante (la parte superior del producto líquido de color ligeramente marrón-amarillento), dejando la parte baja que es donde se depositan los restos de la materia orgánica de color negro. Una vez obtenidos los resultados de las muestras y del sobrenadante correspondiente se puede comprobar la eficacia del proceso de reducción de N y P. El porcentaje de nutrientes retirado en teoría sería la parte de la materia orgánica depositada en el fondo después del proceso de centrifugación.



Fuente: Re-LIVE Waste

**Figura 17. Tanques de proceso**



Fuente: muestras del proceso en planta piloto

**Figura 18. Muestras de suspensión tratada**

**Tabla 8. Parámetros básicos de la fracción líquida entre purín bruto y purín tratado**

Parámetros	Unidades	Purín Bruto				Purín Tratado			
		A1	A2	MIX	CITA	A1	A2	MIX	CITA
Materia Seca	%	1,8	1,8	1,55	1,3	1,5	1,5	1,5	1,5
pH	u.pH	7,70	8.0	7,20	7,2	9,3	9,3	9,0	9,0
NH <sub>4</sub>	mg/l NH <sub>4</sub>	1594	1526	1145	761	900	896	806	538
PO <sub>4</sub>	mg/l	229	229	195	195	792	660	484	217
Volumn del ensayo	l					1500	1500	1500	1500
NaOH input	ml					16000	15000	10000	10000
NaOH input	% v/v					1,1	1,0	0,7	0,7
[PO <sub>4</sub> ] input	mg/l					8183	8183	4818	4818
[Mg] input	mg/l					1885	1885	1035	1035
TOT [PO <sub>4</sub> ]	mg/l					8412	8412	5013	5013
NH <sub>4</sub>									
[NH <sub>4</sub> ] final/inicial	%					56,5	58,7	70,4	70,7
Reducción NH <sub>4</sub>	%					43,5	41,3	29,6	29,3
PO <sub>4</sub>									
PO <sub>4</sub> final/total	%					9,4	7,8	9,7	4,3
Reducción PO <sub>4</sub>	%					90,6	92,2	90,3	95,7

Fuente: Pruebas realizadas en la planta piloto. Análisis realizados en laboratorio autorizado por la Generalitat Valenciana. Informes emitidos el 17 de febrero de 2020

En la Tabla 8 se presentan los resultados de separación de cuatro ensayos, los dos primeros con purín influente procedente de la empresa murciana con centrifugadora Peralisi sin y con polielectrolito (A1 y A2, respectivamente). El tercer ensayo corresponde a una muestra mixta entre el purín procedente del purín de ganado de las instalaciones del CITA de Segorbe y de la mencionada empresa murciana (MIX). El cuarto ensayo sólo contiene purín del propio CITA.

En estas primeras pruebas se comprueba que el proceso puede ser eficaz en la separación de nutrientes, y puede alcanzarse hasta un 40% en la reducción de  $\text{NH}_4$  en el purín de la empresa y del 30% en el purín del CITA. La diferencia puede ser debida a niveles más reducidos de sobresaturación de la muestra del CITA y a las menores dosis de reactivos. No obstante, en la muestra del CITA parece haber una precipitación mayor de fósforo con respecto a las demás. De todos modos, la precipitación de  $\text{PO}_4$  es apreciable en todos los casos.

En cuanto a la fase sólida, en la Tabla 9 se resumen los resultados de los cuatro ensayos realizados. En cualquier caso, el contenido elevado de carbono orgánico y de materia orgánica totales hace plausible categorizar el precipitado obtenido como orgánico. En la muestra A2 el contenido de materia orgánica total y carbono orgánico totales es relativamente elevado debido probablemente el proceso de centrifugación con polielectrolito que favoreció la coagulación, aglomeración y separación de sólidos. Para evaluar el contenido de estruvita en el precipitado y de su pureza se compararon los porcentajes de N, P y Mg en los cuatro ensayos con sus valores teóricos que hemos tomado de los intervalos previstos para la estruvita pura por la Plataforma Europea de Fósforo Sostenible (ESPP, 2015). El contenido de P se adecúa a los valores teóricos en 3 de los 4 casos, mientras que el de Mg sólo no se adapta en la muestra A2, que es precisamente aquella en la que el P es menor que el rango de valores teóricos. Por otro lado, en todos los casos el nivel de N es inferior a los intervalos teóricos. Como el contenido orgánico del fertilizante sólido obtenido es relativamente elevado (>2%) el producto obtenido probablemente podría ser comercializado no como estruvita pura sino como fertilizante orgánico o como O-SEP. En cuanto al pH se sitúa en el 7,2 en 3 de las 4 muestras, lo que favorece potencialmente una liberalización lenta del fósforo en el suelo.

**Tabla 9. Características de muestras de fertilizante sólido (%) según los ensayos realizados**

Componente	Valores teóricos para la estruvita	A1	A2	MIX	CITA
	%	%	%	%	%
N total	4,6 – 6,3	3,3	2,5	3,2	3,3
P	10 – 13,9	12,6	8,1	13,6	13,3
Mg	13,1 – 18,1	16,3	8,8	17,8	16,9
CaO		5,7	4,9	5,0	4,9
Zn (mg/Kg)		623	885	528	566
Cu (mg/Kg)		92	80,8	87	91,6
Materia orgánica total		31,9	53,3	28,6	29,6
Carbono orgánico		14,2	23,8	12,8	13,2
Ph a 19°C		7,2	7,4	7,2	7,2

Fuente: Pruebas realizadas en la planta piloto. Análisis realizados en laboratorio autorizado por la Generalitat Valenciana. Informes emitidos el 17 de febrero de 2020

Hay que tener en cuenta que en los ensayos realizados los niveles de los elementos están en porcentajes muy bajos a consecuencia de la humedad del producto, y los errores son superiores que si se tratase de un producto con menor cantidad de humedad.



Fuente: Muestras tomadas en planta piloto

**Figura 19. Muestras de fertilizante orgánico sólido obtenidas en pruebas piloto**

## 5. DISCUSIÓN

El modelo se ha formulado como una vía de reducir el coste de tratamiento de residuos buscando su valorización. Los modelos de negocio tienen en cuenta la complejidad del problema y la necesaria colaboración de agentes implicados. Se contó con la colaboración de un grupo interdisciplinar en el que participaron una organización profesional agraria, una cooperativa ganadera, un centro de investigación, una fundación ambientalista y un socio tecnológico. El TFM tiene un interés divulgativo y pedagógico en cuanto ilustra cómo se puede diseñar una planta piloto, mejorando otra planta de tratamiento preexistente con un coste de inversión limitado. Las primeras pruebas han permitido validar la eficacia del proceso. Con la divulgación del proyecto se contribuye a crear conciencia sobre las oportunidades que ofrece un enfoque circular en zonas de alta densidad ganadera y exceso de nutrientes.

Se realizó una evaluación técnica y económica de la propuesta. La investigación del mercado potencial y clientes objetivo incluyó la elaboración de un mapa de empatía que incluye lo que pueden ver, pensar, oír y hacer los clientes potenciales del proceso de recuperación de P, incluyendo entre ellos a agricultores y ganaderos con cierta capacidad de innovación y sensibilidad ambiental. El mapa de empatía incorpora las principales preocupaciones y motivaciones para la adopción de nuevas tecnologías de recuperación de fósforo para la fabricación de fertilizante orgánico. Se ha revisado la legislación constatando que, tras la aprobación del nuevo Reglamento de fertilizantes, la regulación de la estruvita y otros tipos de sales de fosfato precipitadas se encuentra todavía en fase de análisis técnico. El Reglamento UE nº 1009/2019 reconoce que *“se ha detectado en el mercado una demanda de determinados residuos valorizados en el sentido de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento y del Consejo, como la estruvita, el biochar y los productos a base de cenizas, para su uso como fertilizantes.”*. El presente estudio contribuye al análisis de viabilidad de la estruvita.

Se calcula que los costes netos de tratamiento se situarían entre 0,1 €/m<sup>3</sup> en el escenario más favorable y 5,7 €/m<sup>3</sup> en el más desfavorable. Las cifras son competitivas en comparación con otras alternativas de reducción de nitrógeno teniendo en cuenta que la precipitación de estruvita está todavía en fase de preparación tecnológica del nivel TRL 6 (tecnología demostrada en un entorno relevante) o TRL 7 (demostración del prototipo del sistema en un entorno operativo).

**Tabla 10. Costes de tratamientos de eliminación de Nitrógeno de purines de cerdo**

Tratamiento	Costes (€/m <sup>3</sup> )
Separacion de fases + Fracción líquida con tratamiento parcial NDN <sup>(1)</sup>	1,5 – 2,6
Separacion de fases + Fracción líquida con tratamiento parcial NDN <sup>(1)</sup>	3,0 – 5,0
Separacion de fases + Fracción líquida con tratamiento parcial NDN <sup>(1)</sup>	4,6 – 8,0
Separacion de fases + Fracción líquida con tratamiento total NDN <sup>(1)</sup>	3,5 – 5,8
Separacion de fases + Fracción líquida con tratamiento total NDN + Fracción sólida compostaje <sup>(1)</sup>	4,6 – 7,1
Sharon/Anamox	0,9 - 1
Microfiltración, Ultrafiltración, Ósmosis Inversa	2,5

NDN: Nitrificación-Desnitrificación, Fuente: Elaboración propia a partir de Campos et al. (2004) y Poletti (2017) <sup>(1)</sup> Costes expresado en €/m<sup>3</sup>, con un coeficiente de densidad de 0,8 t/m<sup>3</sup> y un factor de 1,27 para actualizar a 2019 con el IPC.

Entendemos que este modelo ya tiene una escala que lo asemeja fielmente a un proceso productivo de precipitación del nuevo fertilizante orgánico, pero sería necesario reproducir en lo posible las condiciones tecnológicas reales. En este TFM no hemos detallado todas las características técnicas del proyecto que pueden ser consultadas a La Unió, responsable de la implementación del piloto, y puede ser visitado *in situ*. Sin embargo, hemos podido sintetizar las bases sobre las que se asienta este modelo piloto que ha permitido contrastar la aplicabilidad de la tecnología de recuperación de estruvita.

De todos modos, en este tipo de sistemas se esperan economías de escala lo que ya se comprueba en el coste por m<sup>3</sup>. El coste de capital y los costes laborales pueden aumentar a una fracción de la tasa de incremento de la capacidad animal tratada. El sistema de estruvita podría ampliarse aumentando el tamaño del cristizador o utilizando múltiples unidades. También puede ser posible obtener costes compartidos de este sistema con otras tecnologías de manejo de nutrientes en algún momento, como de hecho se hace en el proyecto piloto del próximo capítulo (no hemos contemplado en nuestros supuestos la posible producción de biogás en una planta integrada). El modelo ha dado lugar a una propuesta de valor, que está todavía en fase de ensayo. Hemos presentado detalles del prototipo o proyecto piloto que ha podido realizar sus primeros ensayos.

No existe un tratamiento que elimine totalmente los purines o los estiércoles. Los únicos componentes eliminables son una parte de la materia orgánica y del nitrógeno. El resto puede separarse o concentrarse. Actualmente, existe una batería de técnicas que incluyen la separación de las fracciones sólida y líquida, la desecación, el compostaje, la incineración de las fracciones sólidas, la filtración por membrana o el tratamiento biológico para que la fracción líquida depurada pueda ser reutilizada posteriormente. Estas técnicas pueden combinarse con otros procesos y, por ejemplo, generar energía, como es el caso de la digestión en instalaciones de biogás (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015). Este TFM no plantea toda la cascada de actuaciones de una estrategia combinada, aunque las soluciones deberían responder a dos necesidades: reducir los costes de transporte y ganar escala, por ejemplo, con plantas de co-generación que permitan tratar decenas de miles de toneladas de deyecciones al año (Foget et al 2012). El estudio de Campos et al. (2004) sugiere que un tratamiento será ventajoso si el coste del mismo más el transporte del efluente tratado es inferior al coste de transporte necesario para valorizar las deyecciones, por ejemplo, para su utilización agronómica.

Se constata que mediante la tecnología propuesta se pueden lograr porcentajes significativos de reducción de nutrientes y producir un fertilizante orgánico sólido. Se considera que los resultados obtenidos pueden comenzar a ser validados en unas primeras pruebas agronómicas. Como el

contenido orgánico del fertilizante sólido obtenido es relativamente elevado el producto obtenido probablemente podría ser comercializado no como estruvita sino como fertilizante orgánico, o como O-SEP. En experiencias previas a nivel internacional, la producción de estruvita se lleva a cabo como parte de un ciclo que cumple otros objetivos, por ejemplo, el manejo y el reciclaje de desechos y subproductos en un contexto de bioeconomía (p. ej. efluentes de agua limpia, acero), etc. En la actualidad, las instalaciones de recuperación de P aún están en fase de prueba con volúmenes poco significativos. Por el momento, son escasas las técnicas disponibles de recuperación de P a partir del estiércol del ganado (Battistoni et al. 2002, Nelson et al. 2003, Westerman et al. 2010). Las principales limitaciones para recuperar estruvita del estiércol y el purín son la alta concentración de sólidos en suspensión y  $\text{Ca}_2^+$ , fuerza iónica elevada, alta alcalinidad y baja reactividad del P soluble. Otra limitación es la heterogeneidad entre sustratos, que dependen del tipo de animales (cerdo, vaca, etc.), especificidades geográficas y pretratamientos (separador mecánico, digestión anaeróbica, etc.). Todos estos parámetros influyen en la reducción de  $\text{NH}_4^+$  y P y en la eficacia del sistema para estabilizar dichos nutrientes en una sal cristalizada.

Por tanto, se trata sólo de unos primeros ensayos y cuando se mejore la eficacia del proceso se podrá valorar mejor las potencialidades como fertilizante orgánico, en función de la normativa que la UE finalmente establezca para la estruvita. Para determinar el valor comercial del precipitado obtenido, es fundamental el resultado de las pruebas agronómicas. Sereco y la Universidad de Sassari, otra entidad socia del proyecto, se encargarán de la interpretación de los datos experimentales de la evaluación agronómica de los fertilizantes obtenidos. Cada socio será informado sobre el resultado del procedimiento de interpretación y podrá comprender las implicaciones del test dentro de su propio contexto dando pistas sobre qué acciones se pueden emprender para mejorar las condiciones y eficacia ambiental y económica de los materiales resultantes.

Son varias las limitaciones del estudio. La viabilidad económica debe ser todavía validada en función de la evaluación de la calidad agronómica del producto, aunque se puede pensar en este modelo de negocio en términos de reducción de costes netos de gestión de residuos. Por otro lado, no hemos contabilizado la posibilidad de que el proceso plantee el tratamiento de residuos distintos del purín, o la posibilidad de poner en valor el efluente de la planta de tratamiento para la fertirrigación de zonas próximas. Otro tema que no hemos abordado en este TFM es el control del rendimiento del proceso y su coste a escala industrial, que serán evaluadas por el equipo de trabajo con los datos que se vayan obteniendo.

## 6. CONCLUSIONES

Las conclusiones se relacionan con los objetivos establecidos para el presente TFM.

1. De acuerdo con su principal objetivo, el trabajo ha formulado un modelo de negocio para la producción de estruvita a partir de residuos orgánicos, en particular estiércol líquido de deyecciones ganaderas.
2. Es posible combinar los métodos Design Thinking y Lean Canvas para estudiar la viabilidad de la reutilización de purines de cerdo y otros influentes orgánicos para la cristalización de estruvita.
3. Se ha comprobado que la producción de fertilizante orgánico como precipitado de estruvita a partir de residuos ganaderos puede ser una alternativa técnicamente viable.
4. La rentabilidad económica debe ser entendida en términos de reducción de costes netos de tratamiento de residuo. Se calcula que los costes netos de tratamiento se situarían entre 0,1 €/m<sup>3</sup> en el escenario más favorable y 5,7 €/m<sup>3</sup> en el más desfavorable. La viabilidad depende críticamente del coste de los reactivos, de la escala de producción, del precio del fertilizante obtenido y de las posibilidades legales de la estruvita, en estudio a nivel europeo.
5. Los ensayos piloto como el realizado en este proyecto permiten aportar datos que avalan los estudios previos a su aprobación como fertilizante. El proyecto piloto está todavía en fase de pruebas y debe ser todavía mejorado en la práctica. En concreto, hacen falta ajustes en la fase de cristalización,

sedimentación y centrifugado, así como probar distintos tipos de influentes. Además, el fertilizante obtenido requiere una validación agronómica.

6. No se han estimado todavía los costes reales del proceso de la planta en pleno funcionamiento ni su rendimiento a escala industrial.

Por tanto, hablamos de un proyecto que tiene que ser desarrollado, con unos costes de implantación, pero que a medida que madure puede resultar viable como alternativa para el tratamiento de residuos orgánicos y su valoración comercial.

## 7. REFERENCIAS

Achat, D.L., Sperandio, M., Daumer, M.-L., Santellani, A.-C., Prud'Homme, L., Akhtar, M., Morel, C., 2014. Plant-availability of phosphorus recycled from pig manures and dairy effluents as assessed by isotopic labeling techniques. *Geoderma* 232-234, 24–33. 10.1016/j.geoderma.2014.04.028.

Antille D.L., Sakrabani R., Tyrrel S.F., Le M.S. & Godwin R.J. (2013) Characterisation of Organomineral Fertilisers Derived from Nutrient-Enriched Biosolids Granules. *Applied and Environmental Soil Science*, 11.

Brod, E., A. Falk Øgaard, E. Hansen, D. Wragg, T. Knapp Haraldsen, and T. Krogstad. 2015. Waste products as alternative phosphorus fertilisers part I: inorganic P species affect fertilisation effects depending on soil pH. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 103 (2): 167.

Calafat, C., Gallego, A., & Quintanilla, I. (2015). Integrated geo-referenced data and statistical analysis for dividing livestock farms into geographical zones in the Valencian Community (Spain). *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 58-67.

Campos, E., Illa, J., Magrí, A., Palatsi, J., Solé, F., & Flotats, X. (2004). Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas. *Generalitat de Catalunya*. [http://www.arc-cat.net/es/altres/purins/guia/pdf/guia\\_dejeccions.pdf](http://www.arc-cat.net/es/altres/purins/guia/pdf/guia_dejeccions.pdf) (consultado en diciembre de 2019).

Comunidades Europeas (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. DOCE núm. 327, de 22 de diciembre de 2000: 1 - 73.

Chesbrough, H., Rosenbloom, R., 2002. The role of the business model in capturing value from innovation. Evidence from Xerox Corporation's technology spin-off companies. *Industrial and Corporate Change*, 11, 529– 555.

De Clercq, L., Michels, E., Meers, E., Buysse, J., & Haumont, A. (2015). *Legal framework of recovered phosphorus (struvite) as fertiliser in North-Western Europe*. Biorefine. Document number: BIOREFINE – WP5 – A19 – P1 - D <https://www.biorefine.eu/sites/default/files/publication-uploads/biorefinelegalframeworkofrecoveredphosphorusstruviteasfertiliserinnorth-westerneurope.pdf> (consultado en Diciembre de 2019).

de Vries, S., Postma, R., van Scholl, L., Blom-Zandstra, G., Verhagen, J., & Harms, I. (2016). *Economic feasibility and climate benefits of using struvite from the Netherlands as a phosphate (P) fertilizer in West Africa* (No. 673). Wageningen Plant Research.

ESPP (2015). *Proposed EU Fertilizer Regulation criteria for recovered struvite*. *European Sustainable Phosphorus Platform*. <https://phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP%20struvite%20FR%20criteria%20proposal%20sent%2024-4-15.pdf> (consultado en diciembre de 2019).

ESPP (2017) Scope Newsletter n°124, February 2017. Brussels. <http://phosphorusplatform.eu/images/scope/ScopeNewsletter124.pdf> (consultado en Noviembre de 2019).

European Environment Agency (2013) Urban Wastewater Treatment. Copenhagen.

FERTINNOWA (2018). Eliminación y recuperación de fósforo (P). Ficha Técnica. Compendio sobre Fertirrigación: 12-11 – 12-18. <https://www.fertinnowa.com/the-fertigation-bible/> (consultado en diciembre de 2019).

Foget H.L., Flotats X., Bonmati Blasi A., Palatsi J., Magrí A. & Schelde K.M. (2011) Inventory of manure processing activities in Europe. Technical Report No. I concerning "Manure Processing Activities in Europe" to the European Commission, Directorate-General Environment. Brussels.

- Foget, H., Flotats Ripoll, X., Bonmatí Blasi, A., Palatsi Civit, J., & Magrí Aloy, A. (2012). End and by-products from livestock manure processing-general types, chemical composition, fertilising quality and feasibility for marketing. Resumen Technical Report No. III concerning "Manure Processing Activities in Europe" to the European Commission, Directorate-General Environment. Project reference: ENV. B. 1/ETU/2010/0007. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/18945/21010\\_technical\\_report\\_III\\_end\\_and\\_byproducts.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/18945/21010_technical_report_III_end_and_byproducts.pdf) (consultado en septiembre de 2019).
- Flotats X., Bonmati A., Palatsi J. & Foget H.L. (2013) Trends on manure processing in Europe. Wastes: solutions, treatments and opportunities. 2nd International Conference, 11-13 September 2013, Braga, Portugal.
- Geissdoerfer, M., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2016). Design thinking to enhance the sustainable business modelling process—A workshop based on a value mapping process. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1218-1232.
- General Environment. Project reference: ENV.B.1/ETU/2010/0007, 184 pp. <http://hdl.handle.net/2117/18944>
- Ghosh, S., Lobanov, S., & Lo, V. K. (2019). An overview of technologies to recover phosphorus as struvite from wastewater: advantages and shortcomings. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-15.
- Hutnik N, Kozik A, Mazieniczuk A, et al. (2013) Phosphates (V) recovery from phosphorus mineral fertilizers industry wastewater by continuous struvite reaction crystallization process. *Water Research*, 47(11): 3635–3643.
- Huygens, D., Saveyn, H., Tonini, D., Eder, P., & Delgado Sancho, L. (2019). Technical Proposals for Selected New Fertilising Materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009): Process and Quality Criteria, and Assessment of Environmental and Market Impacts for Precipitated Phosphate Salts & Derivates, Thermal Oxidation Materials & Derivates and Pyrolysis & Gasification Materials. JRC Science for Policy Report. <https://www.nutrientplatform.org/wp-content/uploads/2019/10/2019-STRUBIAS-rapport-en.pdf> (consultado en noviembre de 2019).
- Jaffer Y, Clark T A, Pearce P, et al. (2002). Potential phosphorus recovery by struvite formation. *Water Research*, 36(7): 1834–1842.
- Kelley, T., & Littman, J. (2001). The Art of Innovation: Lessons in Creativity from IDEO, America's Leading Design Firm, Crown Business. *New York: Crown Business*.
- Kool, A., Marinussen, M., & Blonk, H. (2012). LCI data for the calculation tool Feedprint for greenhouse gas emissions of feed production and utilization. *GHG Emissions of N, P and K fertiliser production*.
- Le Corre K S, Valsami-Jones E, Hobbs P, et al. (2005). Impact of calcium on struvite crystal size, shape and purity. *Journal of Crystal Growth*, 283(3): 514–522.
- Li, B., Udugama, I. A., Mansouri, S. S., Yu, W., Baroutian, S., Gernaey, K. V., & Young, B. R. (2019). An exploration of barriers for commercializing phosphorus recovery technologies. *Journal of Cleaner Production*, 229 1342-1354.
- MAPA (2018). *El sector de la carne de cerdo en cifras. Principales indicadores económicos*. Subdirección General de Productos Ganaderos. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://www.mapa.gob.es/va/ganaderia/temas/produccion-y-mercados-ganaderos/indicadoreseconomicossectorporcinoano2018tcm39-379728.pdf>.
- MAPA (2019) Sector porcino en España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://www.mapa.gob.es/va/ganaderia/temas/produccion-y-mercados-ganaderos/sectores-ganaderos/porcino/> (consultado en Diciembre de 2019).
- MAPAMA (2018). Balance de fósforo de la agricultura española. Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios. Diciembre de 2018. [https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/bp2016\\_metodologia-resultados\\_tcm30-507807.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/bp2016_metodologia-resultados_tcm30-507807.pdf) (consultado en Noviembre de 2019).
- Massey, M.S., Davis, J.G., Ippolito, J.A., Sheffield, R.E., 2009. Effectiveness of Recovered Magnesium Phosphates as Fertilizers in Neutral and Slightly Alkaline Soils. *Agronomy Journal* 101 (2), 323. 10.2134/agronj2008.0144.
- Maurya, A. (2012). *Running lean: iterate from plan A to a plan that works*. O'Reilly Media, Inc.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015). *Evaluación de Técnicas de Gestión de Deyecciones en Ganadería*. Secretaría General Técnica. Madrid.
- Müller, R. M., & Thoring, K. (2012). Design thinking vs. lean startup: A comparison of two user-driven innovation strategies. *Leading through design*, 151, 91-106.C

- Münch, E. V., Benesovsky-Scott, A., Josey, J., & Barr, K. (2001, March). Making a business from struvite crystallisation for wastewater treatment: turning waste into gold. In *2nd international conference on recovery of phosphates from sewage and animal wastes*. Noordwijkerhout, The Netherlands.
- Muryanto S, Bayuseno A P. (2014) Influence of Cu<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> as additives on crystallization kinetics and morphology of struvite. *Powder Technology*, 253: 602–607.
- Nelson, N.O., R.L. Mikkelsen, and D.L. Hesterberg (2003) - Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: Effect of pH, Mg:P ratio, and determination of rate constant. *Bioresource Technology* 89(3): 229-236.
- Osterwalder, A., Pigneur, Y., 2010. Business model generation. A handbook for visionaries, game changers, and challengers. Wiley, Hoboken.
- Osterwalder, A., Pigneur, Y., Bernarda, G., & Smith, A. (2014). *Value proposition design: How to create products and services customers want*. John Wiley & Sons.
- Poletti, L., Toccaceli, A., Poletti, R., Torzuoli, A., Poletti, A. & Santini, S. (2012). Come trattare liquami azotati per recuperare fertilizzante pregiato *Tecnologie e Soluzioni per l'Ambiente n° 4, 18 – 28* <https://www.ambientesicurezza.it/tecnologiesoluzioni-per-lambiente-42012-sommario-e-sintesi/> (consultado en Octubre de 2019).
- Poletti, R. (2017). *Recupero di azoto e fosforo sotto forma di fertilizzante pregiato. STRUVITE Parte I: testing sperimentale su scala pilota industriale*. Gestioni innovative per la gestione dei reflui zootecnici, Arborea 13 Aprile 2017, <https://www.serecobiotest.it/wp-content/uploads/2017/06/PRESENTAZIONE-SerecoArboreaPARTE-I.pdf> (consultado en Enero de 2020).
- Rahaman M S, Mavinic D S, Meikleham A, et al. (2014) Modeling phosphorus removal and recovery from anaerobic digester supernatant through struvite crystallization in a fluidized bed reactor. *Water Research*, 51: 1–10.
- Ries, E. (2011). *The lean startup: How today's entrepreneurs use continuous innovation to create radically successful businesses*. Crown Books.
- Schoumans, O. F., Ehlert, P. A. I., Regelink, I. C., Nelemans, J. A., Noij, I. G. A. M., van Tintelen, W., & Rulkens, W. H. (2017). *Chemical phosphorus recovery from animal manure and digestate: Laboratory and pilot experiments* (No. 2849). Wageningen Environmental Research.
- Schut, M., Klerkx, L., Rodenburg, J., Kayeke, J., Hinnou, L. C., Raboanarielina, C. M., ... & Bastiaans, L. (2015). RAAIS: Rapid Appraisal of Agricultural Innovation Systems (Part I). A diagnostic tool for integrated analysis of complex problems and innovation capacity. *Agricultural Systems*, 132, 1-11.
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., ... & Jonell, M. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562(7728), 519.
- Suzuki K, Tanaka Y, Kuroda K, et al. (2007). Removal and recovery of phosphorous from swine wastewater by demonstration crystallization reactor and struvite accumulation device. *Bioresource Technology*, 98(8): 1573–1578.
- Talboys, P.J., Heppell, J., Roose, T., Healey, J.R., Jones, D.L., Withers, P.J.A., 2016. Struvite: a slow- release fertiliser for sustainable phosphorus management? *Plant and soil* 401, 109–123. 10.1007/s11104-015-2747-3.
- Tarragó Abella, E. (2017). *Assessment of struvite and K-struvite recovery from digested manure*. Doctoral Thesis. Universitat de Girona.
- Westerman, P. W., Bowers, K. E., & Zering, K. D. (2010). Phosphorus recovery from covered digester effluent with a continuous-flow struvite crystallizer. *Applied engineering in agriculture*, 26(1), 153-161.
- Wijnands J.H.M. & Linders G.-J. (2013) Competitiveness Proofing - Fertilising Materials Ex ante evaluation of competitiveness impacts of the European Commission's policy proposal Review of Regulation (EC) no 2003/2003 relating to fertilisers. Technical report, ECORYS & WUR, Den Haag, Netherlands.
- World Bank, 2006. Enhancing agricultural Innovation: How to Go Beyond the Strengthening of Research Systems. World Bank, Washington, DC, p. 118.
- Zhang T, Ding L, Ren H, et al. (2009). Ammonium nitrogen removal from coking wastewater by chemical precipitation recycle technology. *Water Research*, 2009, 43(20): 5209–5215.
- Zhang, T., Jiang, R., & Deng, Y. (2017). Phosphorus recovery by struvite crystallization from livestock wastewater and reuse as fertilizer: a review. In *Physico-Chemical Wastewater Treatment and Resource Recovery*. InTech.