

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Estudio de factibilidad de la recuperación de fósforo en aguas residuales con enfoque en sostenibilidad y economía circular.

### **PROYECTO DE GRADUACIÓN PARCIAL**

Previo la obtención del Título de:

#### **Máster en Ingeniería Civil con Mención en Construcción y Saneamiento**

Presentado por:

Lenin Alexander Dender Aguilar

Denisse Lorena Villavicencio Salazar

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

## **DEDICATORIA**

Le dedico este logro a Dios, por darme vida y darme una familia.

A mi amada madre que me bendice desde el cielo, me dio amor y fuerzas para nunca rendirme. A mi padre por darme el apoyo incondicional y ser mi ejemplo desde niño. Por último, a mi hermano, por ser parte de mi crecimiento personal y motor.

**Lenin Alexander Dender Aguilar**

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro a mi abuela, que ha estado en cada meta alcanzada y espero esté junto a mi en todas las que faltan.

Y a mi mamá, por ser mi ejemplo más grande a seguir, y motivarme siempre a crecer personal y profesionalmente.

**Denisse Lorena Villavicencio Salazar**

# **AGRADECIMIENTOS**

A ESPOL, especialmente FICT, por crear un espacio de amistad y desarrollo para formarnos como profesionales. Al M.Sc. Byron Galarza por su guía y colaboración en este proyecto de titulación. A nuestras familias por siempre apoyarnos en cada etapa de nuestra carrera estudiantil.

**Lenin Alexander Dender Aguilar**

**Denisse Lorena Villavicencio Salazar**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Lenin Alexander Dender Aguilar, Denisse Lorena Villavicencio Salazar*, y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Lenin Alexander  
Dender Aguilar



Denisse Lorena  
Villavicencio Salazar

# EVALUADORES

Nadia Quijano

PROFESOR DE LA MATERIA

Byron Galarza

PROFESOR TUTOR

Byron Galarza

REVISOR EXTERNO

## RESUMEN

El fósforo (P) es un recurso importante para la industria agrícola, sin embargo, este recurso es limitado. A partir de las aguas residuales municipales se puede recuperar P mediante procesos de recuperación y reemplazar el P derivado de la roca fosfato. En la actualidad se han desarrollado varias tecnologías de recuperación de P, que funcionan bajo distintas condiciones, y se debe ver cuál es la más factible y sostenible en el contexto local. El presente estudio es la recopilación de lo encontrado tras una revisión bibliográfica de la situación de P y de las formas más apropiadas de recuperación de P. Paralelamente se analizó la caracterización del agua residual de la planta MBR de ESPOL y de algunas urbanizaciones de Guayaquil. Además, se utilizó el software OpenLCA para identificar los impactos ambientales que tiene cada proceso de recuperación analizado.

Se determinó que los procesos más destacables son AshDec y Crystalactor, por la gran capacidad de recuperación y por su baja demanda de energía, respectivamente. Tras el estudio, se observó que las concentraciones de P podrían ser adecuadas para llevar a cabo estos procesos de manera óptima. De los procesos analizados destacó AshDec, debido a que es el proceso con menor costo de producción y su producto final tiene mejores capacidades como fertilizantes, a pesar de que demanda mayor energía. La inclusión de este tipo de procesos abre una nueva oportunidad de generar un modelo de económico circular, que tenga impactos positivos en el ambiente y en la sociedad.

**Palabras Clave:** Fósforo, Agua residual, Lodos de depuración, Proceso de recuperación y Sostenibilidad

## **ABSTRACT**

*Phosphorus (P) is an important resource for the agricultural industry; however, this resource is limited. P can be recovered from municipal wastewater by recovery processes and replace P derived from phosphate rock. At present, several P recovery technologies have been developed, which work under different conditions, and it is necessary to see which is the most feasible and sustainable in the local context. In this project, a literature review of the P situation and the most appropriate forms of P recovery was carried out. At the same time, the characterization of the wastewater from the ESPOL MBR treatment plant and from some urbanizations in Guayaquil was analyzed. In addition, OpenLCA software was used to determine the environmental impacts of each recovery process analyzed in this project.*

*It was determined that the most outstanding processes are AshDec and Crystalactor, due to their high recovery capacity and low energy demand, respectively. It was also observed that the concentrations of P could be adequate to carry out these processes optimally. Among the processes analyzed, AshDec stood out, because it is the process with the lowest production cost and its final product has better capacities as fertilizers, even though it requires more energy. The inclusion of this type of process opens up a new opportunity to generate a circular economic model that has positive impacts on the environment and society.*

*Keywords: Phosphorus, Wastewater, Sewage sludge, Recovery process and Sustainability*



# ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	VI
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ÍNDICE DE Figuras .....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ABREVIATURAS.....	X
CAPÍTULO 1.....	26
1. INTRODUCCIÓN.....	26
1.1 Antecedentes .....	27
1.2 Problema a resolver .....	27
1.3 Objetivos .....	30
1.3.1 Objetivo General.....	30
1.3.2 Objetivos Específicos.....	30
1.4 Marco teórico.....	30
1.4.1 Fósforo.....	30
1.4.2 Fuentes de fósforo .....	37
1.4.3 Recuperación de fósforo.....	42
1.4.4 Sostenibilidad del fósforo y Economía circular.....	49
CAPÍTULO 2.....	55
2. METODOLOGÍA .....	55
2.1 Revisión bibliográfica.....	55
2.2 Muestreo .....	55
2.2.1 Normativa y procedimientos .....	56
2.3 Selección preliminar .....	56
2.4 Modelado de procesos .....	58

2.4.1	Proceso de cristalización Crystalactor .....	58
2.4.2	Proceso termoquímico AshDec.....	60
CAPÍTULO 3.....		62
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	62
3.1	Tabulación de datos de laboratorio .....	62
3.2	Tabulación de datos externos .....	63
3.3	Resultados de software OpenLCA .....	67
3.4	Modelos de negocio .....	73
3.5	Discusión.....	75
3.5.1	Análisis de ciclo de vida.....	75
3.5.2	Condiciones de Producción .....	77
3.5.3	Costos de operación .....	79
3.5.4	Potencial en Ecuador.....	82
CAPÍTULO 4.....		85
4.	Conclusiones Y Recomendaciones .....	85
4.1	Conclusiones.....	85
4.2	Recomendaciones.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....		88
ANEXOS.....		100
	Anexo 1.- Información Emapag .....	101
	Anexo 2.- Reporte de procesos por software OpenLCA.....	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ciclo de vida del fósforo, enfoque de recuperación en forma de estruvita (Veolia WaterTechnologies, 2015). .....	29
Figura 1.2. Ciclo de vida del fósforo, enfoque de recuperación en forma de ceniza (Kwapinski et al., 2021). .....	29
Figura 1.3. Representación gráfica de ciclo natural y antropogénico del fósforo (Jupp et al., 2021).....	32
Figura 1.4. Distribución del fósforo en fuentes mineras (Cordell & White, 2011).....	34
Figura 1.5. Áreas más importantes de minería de rocas de fosfato (Fahimi et al., 2021). .....	34
Figura 1.6. Formación del superfosfato $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ . Elaborado por: Autores.....	35
Figura 1.7. Fósforo negro. (Ehara et al., 2003).....	36
Figura 1.8. Configuraciones esquemáticas de (a) MBR externo y (b) MBR sumergido. (Orhon et al., 2015) .....	38
Figura 1.9. Formas de fósforo en lodos de depuradora durante diferentes procesos de tratamiento térmico. (Qian & Jiang, 2014). .....	40
Figura 1.10. Relación entre el riesgo de suministro y la importancia económica de los materiales que sirven de materia prima en las industrias (RMIS, 2020).....	43
Figura 1.11. Esquema de proceso de cristalización. (Le Corre et al., 2009). .....	44
Figura 1.12. Fotografías de cristales de estruvita recuperados. (YingHao Liu et al., 2011) .....	45
Figura 1.13. Diferentes tamaños de partículas de estruvita (Urdalen, 2013).....	46
Figura 1.14. Esquema de proceso termoquímico. Elaborado por: Autores .....	47
Figura 1.15. Fracción gaseosa de 6 metales pesados en combinación con cloruros (Adam et al., 2009).....	48
Figura 1.16. Remoción de metales pesados en función de la temperatura (Adam et al., 2009). .....	48
Figura 1.17. Fertilizante producido mediante proceso AshDec (Urdalen, 2013). .....	48
Figura 1.18. Tamaño de la población mundial durante los últimos 12000 años (Roser et al., 2013).....	51
Figura 1.19. Principios para avanzar hacia una economía circular del fósforo. (Geissler et al., 2018).....	52

Figura 1.20. Lienzo del modelo de negocio del ciclo de vida ambiental con sus componentes. (Florian, 2015a).....	53
Figura 1.21. Lienzo del modelo de negocio de los actores sociales con sus componentes. (Florian, 2015b) .....	54
Figura 2.1. Energía requerida vs. costos totales (CHF=franco suizo~US\$) de diferentes tecnologías que recuperan fósforos. (Mayer et al., 2016). .....	57
Figura 3.1. Ubicación de residencias con efluentes analizados. Elaborado por: Autores. ....	64
Figura 3.2. Valores de fósforo por cada zona. Elaborado por: Autores. ....	65
Figura 3.3. Valores de DBO <sub>5</sub> por cada zona. Elaborado por: Autores. ....	65
Figura 3.4. Valores de DQO por cada zona. Elaborado por: Autores. ....	66
Figura 3.5. Valores de Sólidos Suspendidos por cada zona. Elaborado por: Autores...	66
Figura 3.6. Valores de Coliformes Fecales por cada zona. Elaborado por: Autores. ....	67
Figura 3.7. Modelo gráfico del proceso de cristalización Crystalactor. Elaborado por: Autores. ....	68
Figura 3.8. Modelo gráfico del proceso termoquímico AshDec. Elaborado por: Autores. ....	68
Figura 3.9. Comparación de categoría de análisis Ecotoxicidad del agua dulce en unidades kg 1,4-DCB. Elaborado por: Autores. ....	69
Figura 3.10. Comparación de categoría de análisis Eutrofización del agua potable en unidades kg P eq. Elaborado por: Autores. ....	70
Figura 3.11. Comparación de categoría de análisis Calentamiento global en unidades kg CO <sub>2</sub> eq. Elaborado por: Autores. ....	70
Figura 3.12. Comparación de categoría de análisis Toxicidad cancerígena humana en unidades kg 1,4-DCB. Elaborado por: Autores. ....	71
Figura 3.13. Comparación de categoría de análisis Consumo de agua en unidades m <sup>3</sup> . Elaborado por: Autores. ....	72
Figura 3.14. Resumen de comparación de categorías de análisis. Elaborado por: Autores. ....	72
Figura 3.15. Canvas del modelo de negocio económico. Elaborado por: Autores. ....	74
Figura 3.16. Canvas del modelo de negocio ambiental. Elaborado por: Autores. ....	74
Figura 3.17. Canvas del modelo de negocio social. Elaborado por: Autores. ....	75

Figura 3.18. Gráfica comparativa del costo por producir 1kg de  $P_{rec}$  sin ingresos ni ahorros, y el costo con respecto a una PDAR con una carga contaminante de 100000 PE. (Egle et al., 2016). .....81

Figura 3.19. Mapa de porcentaje del número de PDAR a nivel regional (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2016). .....83

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de tratamientos de una planta depuradora de aguas residuales (Ramalho, 2021).....	38
Tabla 1.2. Directrices recomendadas en diferentes ámbitos para gestión sostenible del fósforo (Smol, 2019c). Elaborado por: Autores.....	49
Tabla 2.1. Ensayos realizados en laboratorio y metodología seguida. Elaborado por: Autores. ....	56
Tabla 2.2. Valores de entrada de demanda de recursos para proceso de cristalización. Elaborado por: Autores. (Egle et al., 2016).....	59
Tabla 2.3. Valores de entrada de demanda de recursos para proceso de Empaquetado y transporte. Elaborado por: Autores.....	60
Tabla 2.4. Valores de entrada de demanda de recursos para proceso AshDec. Elaborado por: Autores. (Egle et al., 2016; Hermann & Schaaf, 2019).....	60
Tabla 2.5. Valores de entrada de demanda de recursos para proceso de Empaquetado y transporte. Elaborado por: Autores.....	61
Tabla 3.1. Parámetros caracterizados y resultados obtenidos. Elaborado por: Autores. ....	62
Tabla 3.2. Resultados obtenidos en Test de Jarras. Elaborado por: Autores.....	62
Tabla 3.3. Zonificación de puntos analizados. Elaborado por: Autores.....	63
Tabla 3.4. Resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida. Elaborado por: Autores. ....	69
Tabla 3.5. Normalización de valores de la evaluación del impacto del ciclo de vida. Elaborado por: Autores.....	73
Tabla 3.6. Costos de recursos, tratamientos preliminares, disposición final de residuos, y de productos finales. Elaborado por: Autores. (Egle et al., 2016).....	80
Tabla A.1. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de enero de 2021. Elaborado por: Autores.....	101
Tabla A.2. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de febrero de 2021. Elaborado por: Autores.....	102
Tabla A.3. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de marzo de 2021. Elaborado por: Autores.....	103
Tabla A.4. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de abril de 2021. Elaborado por: Autores.....	104

Tabla A.5. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de mayo de 2021. Elaborado por: Autores.....	105
Tabla A.6. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de junio de 2021. Elaborado por: Autores.....	106
Tabla A.7. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de julio de 2021. Elaborado por: Autores.....	107

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
PDAR	Planta Depuradora de Aguas Residuales
MBR	Biorreactor de Membrana
SM	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
CE	Conductividad Eléctrica
OD	Oxígeno Disuelto
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SS	Sólidos Sedimentables
LCA	Life Cycle Assessment
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
EPA	Environmental Protection Agency
GWP	Global Warming Potential
GHG	Greenhouse Gas
DCB	Diclorobenceno
EMAPAG	Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guayaquil



# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, los procesos y la industria que diseña, construye y opera los sistemas de depuración, han cambiado radicalmente. Esto se debe a la introducción y rápida implementación de la Dirección de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas en Europa, quienes fueron los pioneros en enfocar interés en el área de saneamiento y además quienes tienen mayor cantidad de fuentes minerales de fósforo. La rápida expansión del área de tratamiento de aguas residuales está permitiendo a los fabricantes (Mayer et al., 2016) experimentar con nuevos diseños y procesos innovadores (Gray et al., 2020). Con el fin de mejorar el nivel de sostenibilidad en los servicios de tratamiento de agua residual y gestión de desecho sólidos, se han creado tecnologías innovadoras de saneamiento. Para poder llegar a estas innovaciones se tuvo que retroceder un poco y cambiar la perspectiva, planteando a la pregunta ¿qué se puede recuperar? Es aquí donde entran los conceptos de la recuperación de nutrientes. Es importante priorizar aquellos que son limitados e indispensables para la vida, como lo es el fósforo.

Actualmente, una parte sustancial de la población humana depende de la roca fosfórica como recurso finito, la misma que se utiliza para la manufactura de diversos productos químicos (Chripim et al., 2019). En muchos países europeos se ha intentado durante muchos años utilizar eficazmente diversos tipos de residuos, u optimizar su valorización de acuerdo con el modelo de producción lineal. Hoy sin embargo, como solución a la afectación del ciclo natural del fósforo, es cambiar el modelo de gestión de residuos por el modelo de una economía lineal a una economía circular (Lipińska, 2018a).

Una vez introducido el tema, es necesario ver el problema de manera un poco más enfocado. Cumpliendo con la normativa medioambiental, en la actualidad la industria se ocupa principalmente del abastecimiento de agua, el tratamiento de aguas residuales y lodos de depuración. Sin embargo, se busca que la producción de agua recuperada de las aguas residuales pueda utilizarse para diversos fines tras un tratamiento adecuado; o la recuperación de materias primas energéticas, biógenos (nitrógeno, fósforo) e hidrógeno, o bioplásticos de las aguas residuales y lodos de depuración (Alcalde & Gawlik, 2014). Este nuevo enfoque tiene como objetivos el

desarrollo sostenible, la recuperación de recursos, el ahorro de recursos y energía, la utilización de orígenes de energía renovable, así como la prevención del cambio climático y la eutrofización progresiva de las aguas.

### **1.1 Antecedentes**

El mayor potencial de recuperación de fósforo se puede encontrar en las aguas residuales municipales. En Alemania, hasta el 50% del "fósforo primario" utilizado en los fertilizantes puede sustituirse por "fósforo secundario" recuperado de las aguas residuales (Gellermann, 2021). A raíz de esta nueva visión en el marco de recuperación, se ha decretado que a partir del año 2029 será una obligación legislativa que toda PTAR recupere fósforo en dicho país. Esta iniciativa se da por diferentes estudios realizados que presentan que algunos de los principales impulsores son la disponibilidad limitada de este elemento, el aumento del costo de los fertilizantes fosfatados y la disminución del coste de operación dentro de procesos de depuración. Aterrizando un poco más el tema en el contexto local de Ecuador, es necesario considerar que, en los países en desarrollo, la implementación de sistemas de recuperación de nutrientes es un desafío, porque la principal preocupación es la expansión de la cobertura de saneamiento. Esto implica la necesidad de implementar nuevas tecnologías, y consecuentemente, mayores valores de inversión. Los enfoques de recuperación de recursos pueden proporcionar beneficios más allá de la industria de aguas residuales. No solo se mejora la sostenibilidad de las operaciones de tratamiento de aguas residuales, sino también creando una línea de economía circular para el fósforo que es una materia prima con riesgo de suministro (Chrispim et al., 2019). En el sector agrícola, comúnmente se utiliza el fósforo di-amónico, con nombre comercial DAP por sus siglas en inglés, y el óxido de fósforo ( $P_2O_5$ ). La mayoría de las empresas que se dedican a proveer soluciones al sector vende DAP en saco de 50 Kg a un precio aproximado de \$40 (Agripac; Quimasa). Basándonos en el caso de Alemania, se podría suplir una parte de la demanda de fósforo como materia, y crear un sector agrícola resiliente frente a una potencial escasez o aumento de precio del fósforo.

### **1.2 Problema a resolver**

Debido a que su ciclo se considera como un ciclo biogeoquímico largo, el fósforo es un recurso crítico, geográficamente concentrado y no renovable. Es necesario

para apoyar la producción mundial de alimentos, por ser un nutriente cuya principal función es la formación de huesos y dientes (Royo, 2017). Por la dependencia que tiene la industria alimenticia con el fósforo, los precios de los alimentos también dependen de la disponibilidad de este. Es por esta razón que la escasez de fuentes de fósforo podría llevar a una gran inflación de precios de alimentos (EFMA, 2000). En el ámbito del saneamiento, dependiendo de las circunstancias de ejecución de la planta de depuración, la masa de lodos puede ser reducida entre un 8% y 31% debido al uso de procesos de recuperación de fósforo (Woods et al., 1999). Esta reducción de lodos influye de manera positiva en los costos de manejo de estos, y a nivel de disposición final se extiende el periodo de servicio de rellenos sanitarios por la reducción de volumen lodos. Por otro lado, la mayoría del fósforo en una planta de tratamiento es removido por los lodos, sin embargo, el restante (1.5 T/año) es descargado como agua tratada a cuerpos de agua (Van Drecht et al., 2009). Por ende, la alta concentración de fósforo en la descarga de la planta conlleva a la eutrofización del cuerpo de agua donde se está descargando. En Ecuador todavía existe una falta de incentivo de recuperación de recursos en subproductos en el proceso de tratamiento. La recuperación fósforo a partir de lodos ayudaría a disminuir la huella negativa de los lodos al no darle una disposición final adecuada y reduciendo el volumen de lodos destinados a los rellenos sanitarios. Además, se estaría cumpliendo con las bases técnicas de la normativa de principios de economía circular que está proponiendo el INEN como ente gubernamental, bajo la norma técnica de Economía Circular denominada: NTE INEN – AFNOR XP X30-901 Economía Circular, como parte para garantizar modalidades de consumo y producción sostenible para el Ecuador. Esta normativa se dirige a instituciones del sector público o privado, que busquen gestionar sus recursos enfocándose en propósitos de economía circular, permitiéndoles acoger prácticas que mejoren los métodos de fabricación, costumbres de consumo y gestión de residuos, fundando beneficios “verdes”.



Figura 1.1. Ciclo de vida del fósforo, enfoque de recuperación en forma de estruvita (Veolia WaterTechnologies, 2015).

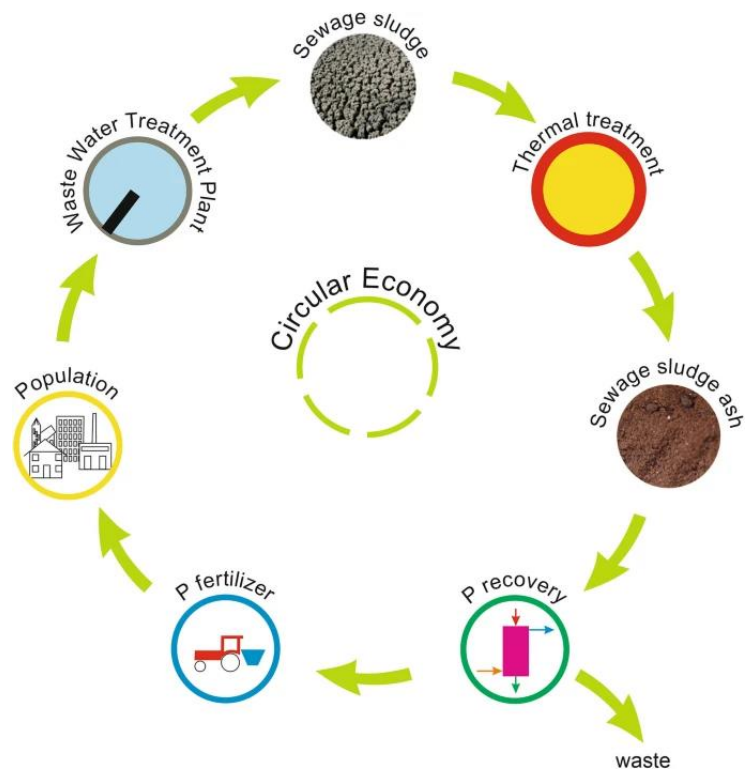


Figura 1.2. Ciclo de vida del fósforo, enfoque de recuperación en forma de ceniza (Kwapinski et al., 2021).

Lo que se busca es una solución a la escasez del elemento aprovechando el alto potencial de recuperación de fósforo que existe en procesos depuradores, en donde dependiendo de ellos, se puede obtener porcentajes que varían de 45% hasta 95% en recuperación (Smol, 2019a). Los flujos de fósforo perdidos pueden recuperarse y reutilizarse, junto con mejoras en la eficiencia de su uso.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Estudiar la factibilidad de la recuperación de fósforo a partir de los subproductos generados en una planta depuradora con una visión local en Guayaquil, mediante revisión bibliográfica, para la aportación de la economía circular en el ámbito del saneamiento.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Presentar alternativas de recuperación de fósforo dentro de una planta depuradora, a partir de los subproductos del tratamiento de las aguas residuales.
- Analizar el ciclo de vida (ACV) de las alternativas de recuperación del fósforo considerando los escenarios en los procesos de recuperación analizados.
- Desarrollar un modelo de negocio que se base en la economía circular mediante propuestas de comercialización del fósforo recuperado.

### **1.4 Marco teórico**

Con el fin de describir los procesos a analizar en este estudio, a continuación, se explican conceptos importantes a considerar, y orígenes de las causas de investigación.

#### **1.4.1 Fósforo**

El elemento que se ha visto desde siempre en la tabla periódica, llamado fósforo (P), es indispensable para los seres vivos y que no puede ser suplido por algún otro elemento (Seyhan, 2009). Este elemento se lo obtiene mayormente a partir de la minería y el procesamiento de rocas ígneas o sedimentarias con depósitos de fosfato y el 80% es usado en la agricultura como fertilizantes (Weigand et al., 2011).

Este elemento es un recurso finito, que, según estudios, probablemente se podrá explotar mediante minería hasta 50-100 años más (Yi Liu et al., 2007). Sin

embargo, la asociación Soil Association del Reino Unido reporta que el suministro de fósforo en las canteras alcanzaría hasta el 2033 (UK Soil Association, 2010).

#### **1.4.1.1 Ciclo del fósforo, proceso biogeoquímico**

El ciclo del fósforo comienza cuando los microorganismos y plantas absorben el fósforo de los minerales meteorizados en el suelo y riachuelos. El fósforo regresa al suelo cuando los animales se alimentan de estas plantas y realizan excretas, y mediante la descomposición de las plantas y animales después de su muerte (Jupp et al., 2021). El proceso anterior se repite reiteradamente, aunque algo de fósforo se pierde por precipitación en vías fluviales y finalmente en el mar. Durante largos periodos de tiempo, que pueden variar de 20,000 a 100,000 años, cumpliéndose este proceso, el fósforo se reintegra a la roca sedimentaria (Withers et al., 2015).

Por otro lado, el uso de fertilizantes en la agricultura aumenta el contenido de fosfato en el suelo, lo cual provoca una pérdida inevitable del fósforo por escorrentías y finalmente en cuerpos de agua. Este efecto provoca la eutrofización del agua por el exceso de fósforo en ella, causando molestas floraciones de algas que consumen el oxígeno del agua y por ende, causando pérdida de biodiversidad acuática, es decir, afectando directamente el ecosistema marino (Wang et al., 2019). Es evidente que el uso excesivo de fósforo en fertilizantes y productos alimenticios está generando que el ciclo del fósforo se convierta en un proceso de consumo lineal, el cual no se repone de la misma forma que se consume. Una forma de estabilizar o aliviar el ciclo del fósforo es mediante la recuperación de este desde fuentes secundarias o residuos industriales, como se muestra en la Figura 1.3. La acción antropogénica de recuperar y reciclar el fósforo en las industrias de aplicación permite que el ciclo natural de restauración del fósforo se dé más rápido.

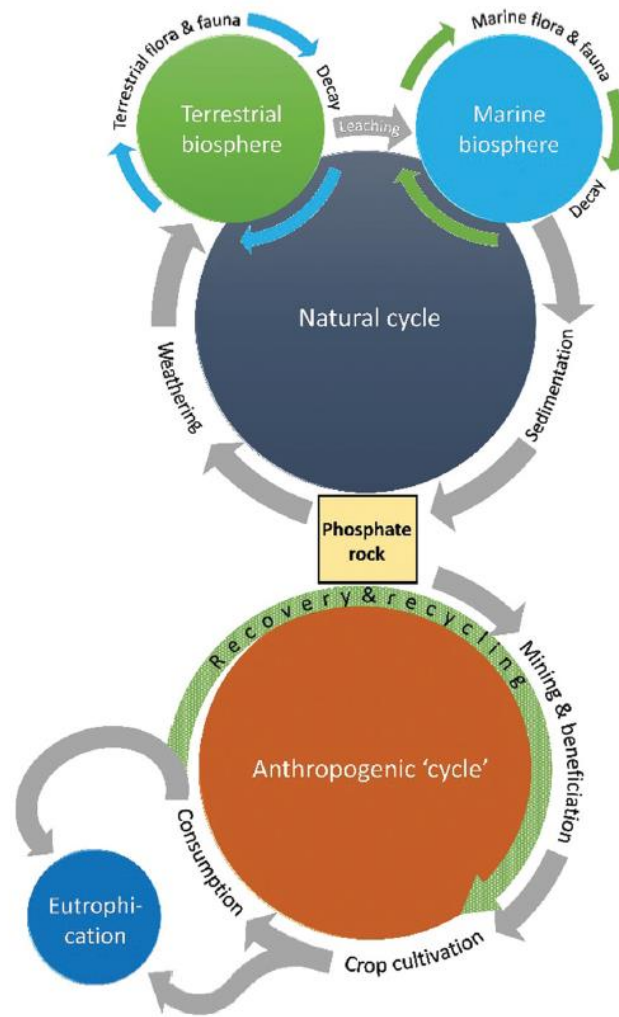


Figura 1.3. Representación gráfica de ciclo natural y antropogénico del fósforo (Jupp et al., 2021).

#### 1.4.1.2 Distribución del fósforo en el mundo

El fósforo en el planeta es un recurso que está distribuido de manera inequitativa y apartada. Se puede encontrar de dos tipos de roca mayormente, rocas sedimentarias y rocas ígneas. Tres cuartas partes del suministro total de fósforo se concentra en Marruecos y Sahara Occidental, mientras que el cuarto restante se distribuye en China, Estados Unidos y Rusia, como se observa en la Figura 1.4 y Figura 1.5 (Van Kauwenbergh, 2010).

En las últimas décadas ha habido un incremento en la minería de la roca fosfato, debido al incremento de la demanda de fertilizantes en los países en vía de desarrollo. Solo en Latinoamérica, comparando el año 1999 con 1993, la producción alcanzó 5711 toneladas, mostrando un crecimiento del 62%. Para el año 2002 la producción alcanzó 6268 toneladas, es decir, la explotación de roca

fosfórica había incrementado abruptamente en un 78% hasta esas fechas (Vega, 2006). Por otro lado, Europa es el continente más dependiente de las importaciones de la roca fosfato (Desmidt et al., 2015).

La necesidad de los agricultores y fabricantes de fertilizantes de fósforo es suplementada controladamente por estos 5 países. Sin embargo, no existen leyes o políticas internacionales para garantizar la accesibilidad y disponibilidad de este elemento a corto o largo plazo (Cordell, 2010). Esta monopolización que existe abre la posibilidad de un escenario crítico para la distribución de este recurso si estos países deciden parar sus operaciones creando una escasez relativa. La escasez relativa de un producto se refiere al grado en que su producción satisface los requisitos del mercado. Si la demanda excede la oferta, la escasez relativa de este producto es fuerte; si la oferta excede la demanda, la escasez relativa de este producto es débil (He et al., 2017). Lo que significa que, puede llegar a existir una extrema volatilidad de los precios.

Se ha expresado por varios autores que la reserva de fosfato económicamente disponible entra su punto máximo entre los 20 y 200 años dependiendo de la producción (Cisse & Mrabet, 2004; Cordell et al., 2009a; Van Vuuren et al., 2010). Esta problemática conllevaría a un escenario de gran demanda, excediendo por mucho a la oferta, traduciéndose en una escasez de materia prima. Como se ha mencionado antes las expectativas negativas que se tiene de las reservas de fosfato tienen influencia en el precio de la roca fosfato y en sus productos derivados. Mientras la demanda siga creciendo, el costo de la minería de la roca fosfato aumenta a la par, debido a la disminución de la calidad que se está presentando, que crea una extracción y refinación más costosa (Heffer et al., 2006). Son muchos los factores, como el precio de la roca en sí, el aumento de la población mundial y la demanda para comida relacionada la agricultura, que determinaran el periodo de escasez de la roca fosfato.



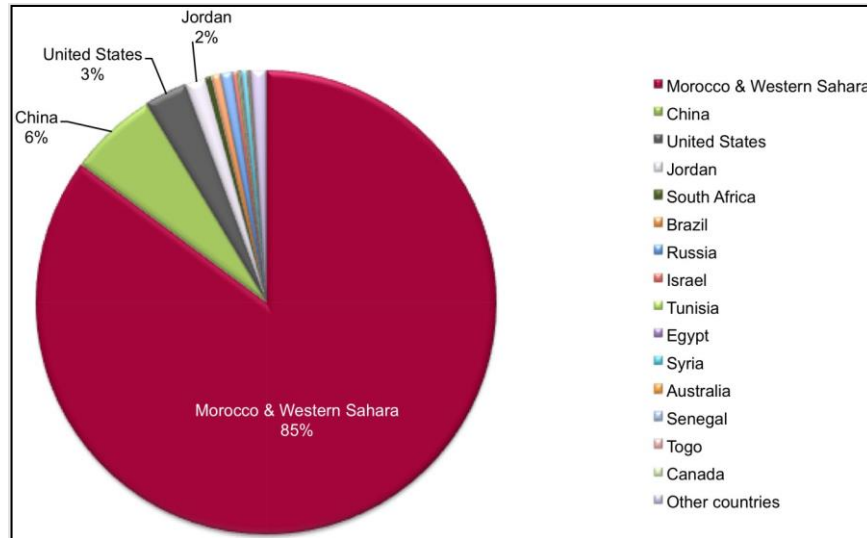


Figura 1.4. Distribución del fósforo en fuentes mineras (Cordell & White, 2011).

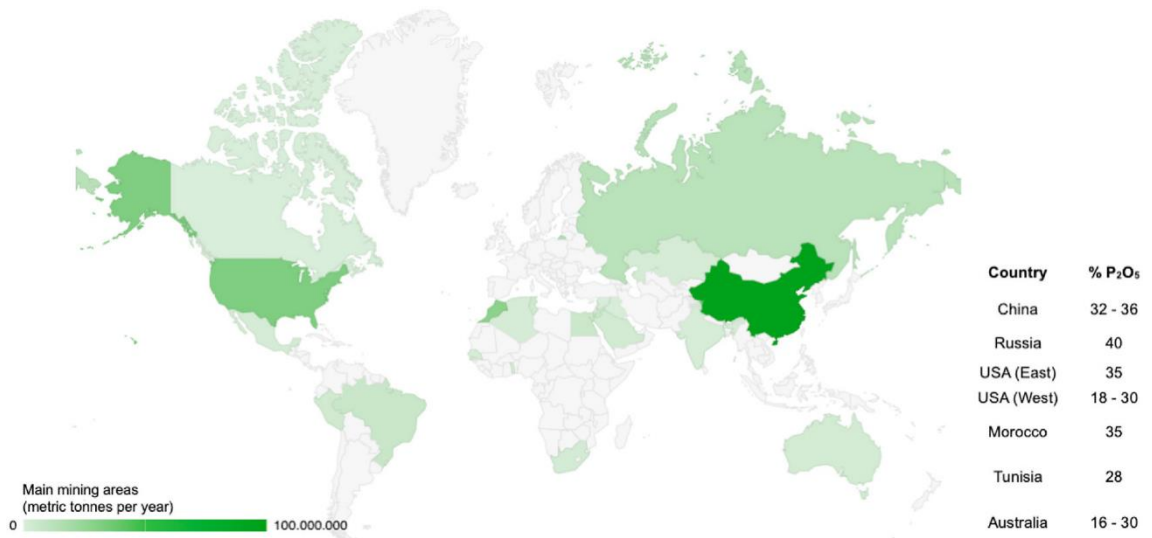


Figura 1.5. Áreas más importantes de minería de rocas de fosfato (Fahimi et al., 2021).

### 1.4.1.3 Aplicación del fósforo

#### 1.4.1.3.1 Fertilizante

Se conoce que la roca fosfórica es la materia prima para la fabricación de los fertilizantes de fósforo, pero ésta en sí rara vez se usa directamente como fertilizante debido a la baja disponibilidad de fósforo y al costo de transporte; en cambio, el fosfato de roca finamente molido se trata con ácido sulfúrico para producir fosfato monocálcico monohidrato y se conoce como superfosfato (Green, 2015) (ver Figura 1.6). Esto es lo que alrededor del mundo se ha implementado, incluso en estudios variados, que muestran

métodos de fertilización con el fósforo y otros diferentes elementos como urea, sulfato de amonio, o nitrato de amonio. Uno de ellos mostró la respuesta de la planta de papaya bajo este fertilizante en diferentes concentraciones, en donde se encontró que el fósforo aceleró el crecimiento general de la planta, aumentando en un 15% la altura de planta, un 10% el ancho del dosel y un 30% la circunferencia del tallo, en contraste con los procesos que no cuentan con fertilización fosfatada (Bueno-Jáquez et al., 2014).

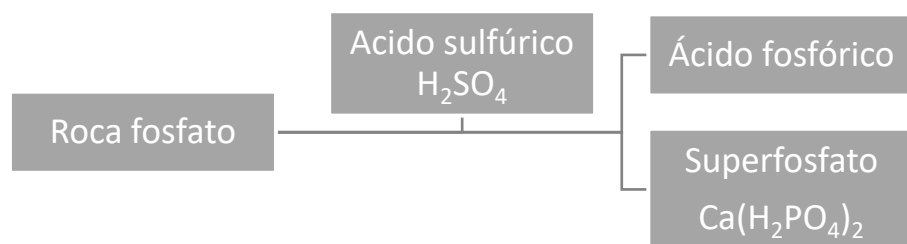


Figura 1.6. Formación del superfosfato  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ . Elaborado por: Autores.

#### 1.4.1.3.2 Detergente

El uso doméstico de detergentes en polvo diseñados para la limpieza de tejidos puede contribuir al aporte de fósforo en las aguas residuales (Gomes de Quevedo & da Silva Paganini, 2015). A pesar de la necesidad de utilizar detergentes para proteger la salud pública, la eliminación inadecuada de sus aguas residuales tóxicas podría presentar problemas. Los fosfatos aumentan la población de microorganismos y como resultado, un agotamiento del oxígeno disuelto en los reservorios de agua debido a sus actividades microbiológicas y al fenómeno de eutrofización (Koohsaryan et al., 2020). Mencionado esto, el fósforo y su uso en productos químicos sin duda ejemplifica muy claramente la controversia científica y política sobre los esfuerzos para controlar su descarga a las aguas superficiales. Muchos investigadores y organizaciones han recomendado controles para reducir el contenido de fósforo en los detergentes desde la década de los sesenta, y progresivamente ha ido disminuyendo, sin embargo, actualmente el contenido de fósforo de los detergentes es solo aproximadamente la mitad de los niveles de 1970 (Maki et al., 1984). El fósforo detergente en efluentes puede

regularizarse con límites permisibles, pero si se quiere lograr una reducción sustancial del fósforo en las descargas de estas aguas municipales, es necesario modificar el proceso de tratamiento, incluyendo una fase de recuperación previa a la descarga, lo cual eleva el costo entre un 10 y un 20% en comparación con el tratamiento convencional (Balmér & Hultman, 1988).

#### 1.4.1.3.3 Otros

Desde hace casi un siglo se conoce el fósforo negro (BP), el cual comenzó a recibir más atención de científicos e investigadores en todo el mundo en los últimos tres años, debido a sus excelentes propiedades eléctricas y, por lo tanto, a su alto potencial para aplicaciones prácticas en el campo de la electrónica, la energía y la infraestructura, con oportunidades en nanoelectrónica, optoelectrónica, almacenamiento de energía, sensores, etc.



Figura 1.7. Fósforo negro. (Ehara et al., 2003).

Esta fue probablemente la motivación detrás del uso del método de exfoliación mecánica para la extracción de fósforo negro en 2014 (Ehara et al., 2003). Sin embargo, su inestabilidad ambiental sigue siendo crítica lo que hace su desarrollo y requiere de un estudio más prolongado (Koohsaryan et al., 2020). Por otro lado, el fósforo juega un papel indispensable en el metabolismo energético, la proporción ácido-base y la transferencia de sustancias genéticas. A medida que avanza la nanotecnología, se han desarrollado muchos nanomateriales basados en fósforo y se han utilizado ampliamente en las áreas tanto de medicina como de biología (Caminade & Majoral, 2005). Las excelentes propiedades encontradas en el fósforo promueven aún más las aplicaciones de nanomateriales a base de fósforo en nanoportadores de fármacos, teranósticos tumorales, biosensores y formación ósea (Tang et al., 2020).

## **1.4.2 Fuentes de fósforo**

### **1.4.2.1 Fuente Mineral**

Antes, la fuente original de fósforo eran los huesos y a medida que transcurre el tiempo, su suministro se va agotando. Hoy en día, la roca fosfórica es la única materia prima en forma de fertilizantes fosfatados, lo que hace un mercado rentable para los pocos competidores, entre ellos una empresa de la India llamada United Phosphorus Limited, líder en la industria (Guzmán, 2014), PI Industries, Bayer CropScience Ltd, entre otros . Existen dos principales tipos de rocas fosfatadas: ígneos y sedimentarios; ambos tienen el mismo mineral fosfato, es decir, fosfato cálcico del grupo apatita. La apatita,  $(Ca_5(PO_4)_3(OH,F,Cl)) \cdot 2H_2O$ , es omnipresente en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, aunque generalmente en pequeñas cantidades. La apatita es la fuente principal de fósforo y, debido a su velocidad de disolución relativamente rápida, puede ser una fuente importante de calcio en suelos sin carbonato (Nezat et al., 2008). Los principales depósitos de apatita se encuentran en Estados Unidos, seguidos de China, Marruecos y Rusia (Samreen & Kausar, 2019). Sin embargo, la roca de fósforo es un recurso finito y los estudios sobre el tamaño exacto y la longevidad de las reservas de fosfatos restantes informan que el fósforo alcanzará el pico en una escala de tiempo humana (Cordell et al., 2009b).

### **1.4.2.2 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales**

Una planta de tratamiento es una instalación diseñada para recibir flujo de agua contaminada proveniente de fuentes domésticas, industriales y comerciales; y separar los contaminantes del agua a partir de procesos físicos, químicos y biológicos (Mishra & Mahanty, 2012). El proceso de depuración generalmente se define en tres pasos o fases (ver Tabla 1.1). El objetivo de la etapa de pretratamiento de las aguas residuales, es separar la fracción sólida en el agua, para que en el tratamiento secundario sea más fácil remover otros contaminantes (Ramalho, 2021). Por otro lado, el tratamiento primario es considerado para remover sólidos orgánicos e inorgánicos a través de técnicas de sedimentación y flotación (Crini & Lichtfouse, 2019) 2019). El tratamiento secundario tiene como objetivo remover residuos orgánicos y sólidos suspendidos mediante en el tratamiento biológico del efluente del tratamiento primario utilizando microorganismos en ambientes controlados (Sonune & Ghate, 2004).

Tabla 1.1. Tipos de tratamientos de una planta depuradora de aguas residuales (Ramalho, 2021).

<b>Pretratamiento - Primario</b>	<b>Secundario</b>	<b>Terciario o Avanzado</b>
Cribado	Lodos activados	Micromembrana
Sedimentación	Aireación prolongada	Carbón activado
Flotación	Laguna de aireación	Ósmosis inversa
Separación de aceites	Estabilización con lagunas	Electrodialisis
Homogenización	Filtros biológicos	Cloración y Ozono
Neutralización	Tratamientos anaerobios	

Lo mencionado explica el proceso básico de una planta residual, sin embargo, especificaciones de este pueden variar dependiendo del tipo de proceso depurador que sea. En ESPOL, por ejemplo, se tiene más de un tipo de plantas depuradoras, una de ellas es la planta MBR.

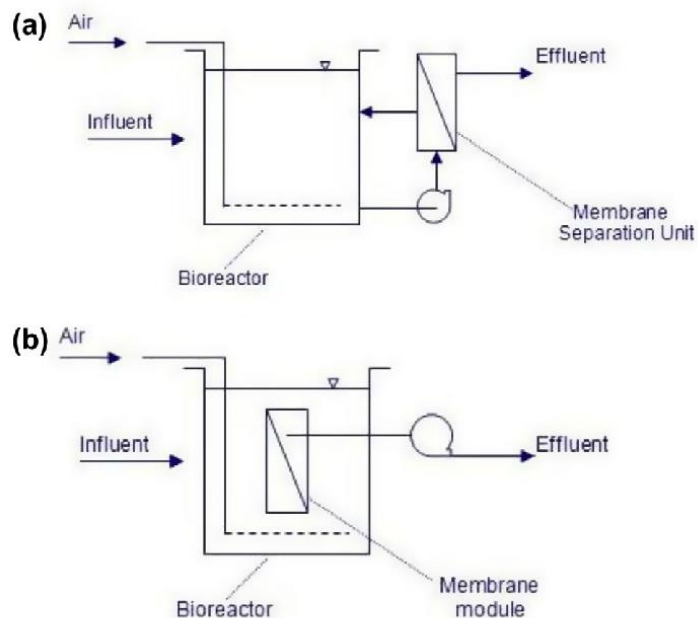


Figura 1.8. Configuraciones esquemáticas de (a) MBR externo y (b) MBR sumergido. (Orhon et al., 2015)

Un MBR es un sistema compuesto que contiene unidades para la degradación biológica y la filtración física (Sun et al., 2010). Algunas de las numerosas ventajas que explican la amplia popularidad de los MBR son: la alta calidad del efluente (Brindle & Stephenson, 1996), generación de pequeñas cantidades de lodos (Le-Clech et al., 2006) y una mayor capacidad para eliminar contaminantes (Weerasekara et al., 2014). Sin embargo, la bioincrustación de las membranas utilizadas sigue siendo el principal obstáculo que dificulta el proceso con sistemas de MBR (Kimura et al., 2009).

#### **1.4.2.2.1 Aguas residuales**

Las aguas residuales son definidas como agua que han sido usada por viviendas, industrias, y establecimientos comerciales que, a menos que no sea tratada, ya no tiene un interés útil por su contenido contaminante (Raschid-Sally & Jayakody, 2009). Se incluye el agua que proviene de los fregaderos domésticos, lavadoras, cocina y descargas de sanitarios que contiene una combinación de nutrientes y químicos. Generalmente contienen una gran demanda de oxígeno y altas cargas de patógenos, materiales orgánicos, nutrientes, minerales inorgánico y sedimentos (Sonune & Ghate, 2004). La contribución industrial está conformada por carbono, nitrógeno, y fósforo, así como también otros químicos propios de cada industria (United State Enviromental Protection Agency (EPA), 2004).

Las aguas residuales son clasificadas en función de su origen, pueden ser aguas municipales o industriales. Dentro de las aguas municipales están las aguas residuales domésticas, que son principalmente una combinación entre heces fecales, orina, y agua gris (Gerba & Pepper, 2019). El volumen de agua residual municipal generada depende de la población servida de agua potable y de sistema de alcantarillado, de la contribución per cápita y hábitos de vida (D. H. F. Liu & Lipták, 2020).

Por otra parte, la calidad del agua residual puede ser definida por parámetros físicos, químicos y biológicos. Los parámetros físicos son el color, olor, temperatura, turbiedad, grasas y aceite. Los parámetros químicos están asociados al contenido orgánico como demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, demanda total de oxígeno y carbono orgánicos totales. También están los parámetros químicos inorgánicos como salinidad,

dureza, pH, acidez, alcalinidad, etc. Por último, los parámetros biológicos incluyen coliformes fecales, patógenos específicos y los virus (D. H. F. Liu & Lipták, 2020).

#### 1.4.2.2 Lodos de depuración

Como se mencionó anteriormente, un gran potencial de nutrientes se hallan en las aguas residuales municipales, pero una forma de controlar la contaminación del agua se presenta cuando los nutrientes como el fósforo se concentran en el lodo.

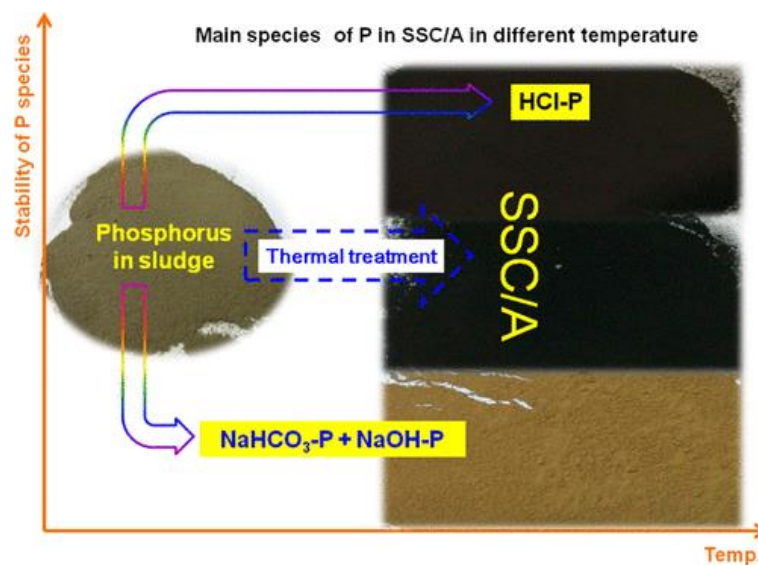


Figura 1.9. Formas de fósforo en lodos de depuradora durante diferentes procesos de tratamiento térmico. (Qian & Jiang, 2014).

Los lodos de depuradora juegan el papel principal entre las materias primas secundarias en Alemania (Schipper et al., 2001). A pesar de la polémica discusión, es el considerable contenido de fósforo de los lodos de depuradora lo que parece justificar el reciclaje y la utilización en la agricultura. Desde un punto de vista económico, esparcir lodos en tierras agrícolas significa una recuperación de fósforo a bajo costo (Lundin et al., 2004). Sin embargo, la recuperación de este elemento de los lodos cloacales también puede generar problemas, ya que puede convertirse en un sumidero de metales pesados (Joss et al., 2006). Debido a esto, los estudios recomiendan la purificación en solución para eliminar los metales pesados antes de precipitar el fósforo, si lo que se utiliza es el método de lixiviación con soluciones ácidas o alcalinas, a partir de las cenizas de lodos de depuradora (Biswas et al., 2009).

#### **1.4.2.2.3 Remoción de fósforo**

Como se conoce, se busca la remoción de fósforo de las aguas residuales con el fin de evitar la eutrofización, y esto se puede lograr mediante remoción química, tratamiento biológico avanzado o una combinación de ambos, ya que los filtros percoladores solo eliminan aproximadamente el 15% del fósforo afluente y las plantas de lodos activados convencionales eliminan aproximadamente del 30 al 40% de fósforo. Por lo tanto, se requiere la aplicación de técnicas avanzadas de tratamiento de aguas residuales, ya sean químicas o biológicas, para reducir las descargas de fósforo a las masas de agua eutróficas. La remoción química de fósforo en una planta de tratamiento se realiza generalmente por precipitación, en el cual se usan coagulantes metálicos, llevando a los compuestos de fósforo a un tamaño que sea fácil de separar (de Gregorio et al., 2010). La remoción en los lodos implica la adición de cloruros de hierro o sales de calcio, hierro y aluminio para lograr la precipitación del fósforo mediante varios mecanismos (De Gregorio, 2015; Yeoman et al., 1988) Por otro lado, la remoción biológica se basa en mejorar la capacidad de los microorganismos para absorber más fósforo en sus células, por esta razón, estos procesos a menudo se denominan procesos de eliminación biológica mejorada de fósforo (EBPR) (Sathasivan, 2009). Estos tipos de procesos generalmente dan como resultado una eficiencia de eliminación de todo o nada. Cuando la planta está funcionando bien, el grado de remoción es alto, mayor al 95%, y cuando algo sale mal, la eficiencia de eliminación se reduce drásticamente, menos del 50% (Ji et al., 2020).

Se han publicado estudios en donde se muestran las características de adsorción de la alúmina activada tratada con sulfato de aluminio para desarrollar nuevos procesos de remoción de fósforo de baja concentración en aguas de ríos y lagos, estos procesos incrementaron la eficiencia aproximadamente 1.7 veces mediante el tratamiento con sulfato de aluminio (Hano et al., 1997). Por otro lado, también se ha investigado la remoción de fósforo mediante óxidos de hierro biogénicos, proporcionando una caracterización inicial de un sorbente rico en hierro potencialmente regenerable. Tras el análisis de sus resultados, la alta capacidad de sorción



mostrada justifica una evaluación adicional de los óxidos de hierro biogénicos como sustrato para la eliminación del fósforo (Rentz et al., 2009).

### **1.4.3 Recuperación de fósforo**

#### **1.4.3.1 Políticas internacionales**

Para recuperar el fósforo, se deben cumplir las regulaciones del mercado y las leyes de protección de la salud y el medio ambiente. A menudo, se requieren varios permisos y largos procesos de autorización para ambas instalaciones. Existen exenciones a ciertos procesos de registro para recuperadores, pero rara vez se aplican, por lo que, frecuentemente se necesitan soluciones locales (Hukari et al., 2016). Es irrefutable que el fósforo recuperado es un desafío, siendo algunas de las barreras identificadas la integración entre las partes interesadas y las instituciones, las políticas y regulaciones públicas, así como la aceptación pública y la viabilidad económica (Chripim et al., 2019). En 2014, el elemento primario fósforo fue declarado como materia prima crítica por la Unión Europea (Blankesteyn, 2019). Esto es corroborado por el sistema de información de materia prima de la Unión Europea (RMIS, 2020). Siendo unos con mayor impacto económico y mayor riesgos de suministro. Según la Figura 1.10, se vuelve uno de los elementos de los cuales se debe procurar la generación de fuentes reutilizables. Se puede ver como se expone al fósforo, enmarcado en amarillo, entre otros materiales, como un elemento de materia prima en estado crítico.

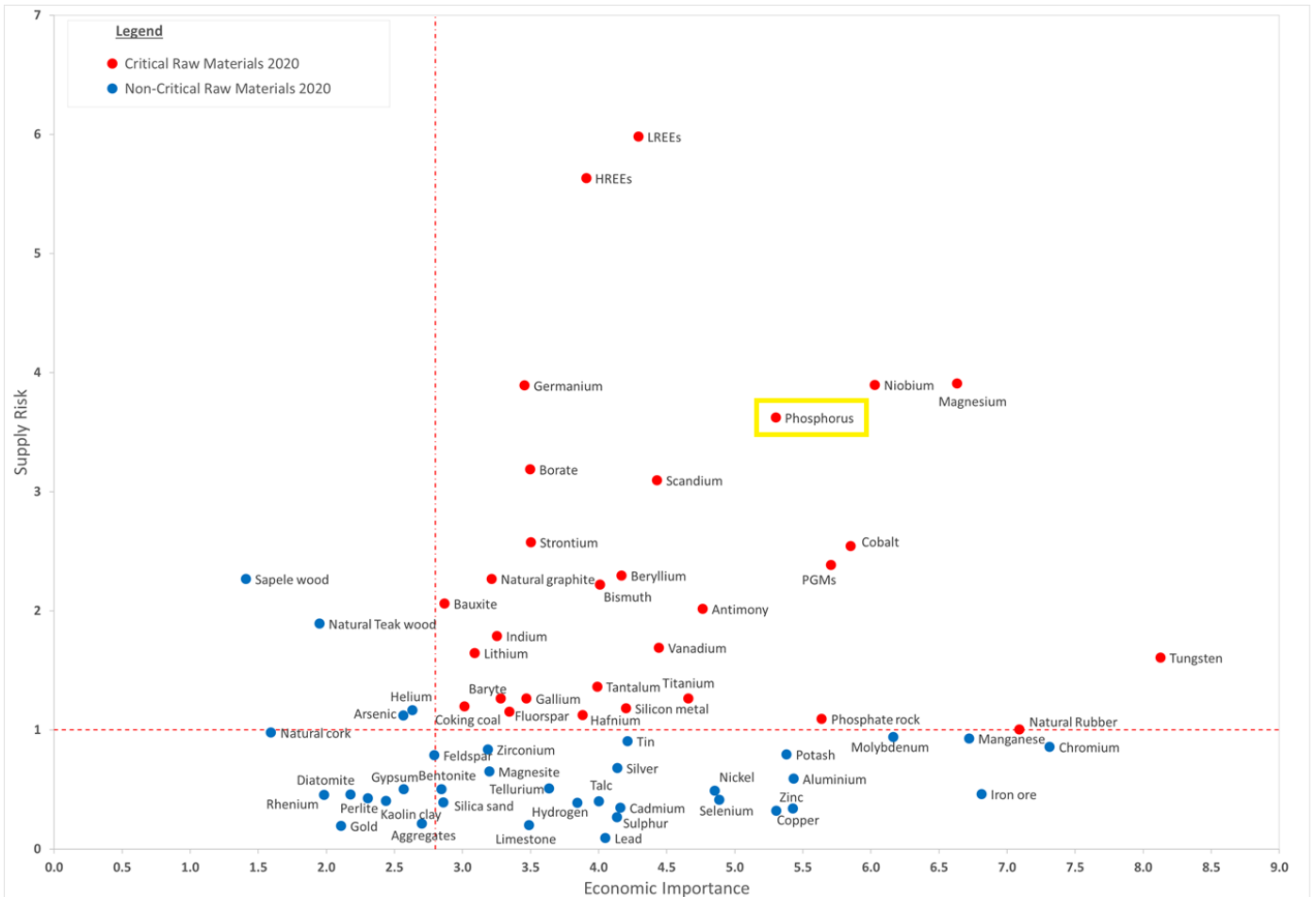


Figura 1.10. Relación entre el riesgo de suministro y la importancia económica de los materiales que sirven de materia prima en las industrias (RMIS, 2020).

La legislación europea que controla las instalaciones de recuperación y reciclaje incluye la Directiva de Evaluación de Impacto Ambiental y la Directiva sobre Emisiones Industriales, relativas a la estimación de las consecuencias de estos específicos proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente, además de definir las autoridades competentes que confiere al promotor el derecho a realizar el proyecto (Unión Europea, 2021). Cualquier otra instalación industrial deben pasar por un proceso de permiso similar (Hukari et al., 2016).

Actualmente, se sabe que Suiza fue el primer país en hacer obligatoria la recuperación de fósforo para los lodos de depuradora y los residuos de los mataderos con un período de transición de 10 años (Günther et al., 2018). Suecia y Austria siguieron el ejemplo y propusieron la recuperación obligatoria de fósforo de los lodos de depuradora o tasas específicas de reciclaje que se alcanzarían (Mayer et al., 2016). También, Alemania aprobó la nueva Ordenanza sobre lodos

de depuradora, que requiere recuperación e impide el uso de la tierra de los lodos de depurador; y se ha decretado que a partir del año 2029 será una obligación legislativa que toda PTAR recupere fósforo en dicho país (ESPP, 2020).

### 1.4.3.2 Técnicas de recuperación

#### 1.4.3.2.1 Cristalización y precipitación

La formación de cristales o cristalización es un proceso complejo que conlleva a la aparición de una fase sólida hecha de estructuras llamadas cristales. Este proceso es normalmente usado con el fin de separar, de manera que la fase deseada quede en estado sólido (Le Corre et al., 2009). Este proceso químico se puede dividir en dos partes:

Nucleación o nucleación primaria: Es la creación del cristal en un ambiente líquido o gaseoso, en una solución donde los iones se combinan para formar cristales (Mullin, 2001). Esta creación de microcristales es gobernada por la cinética de la reacción, por esa razón se pueden formar accidentalmente en las áreas de turbulencias como bombas, válvulas o propelas (Le Corre et al., 2009). Además, el pH en el que se desarrolla este proceso interviene en la tasa de formación de cristales (Neethling & Benisch, 2004).

Crecimientos de cristal o nucleación secundaria: es el desarrollo de los microcristales a macrocristales, donde los cristales aumentan su tamaño hasta formar un cristal visible a la vista (paso posterior a la nucleación primaria) (Jones, 2002).

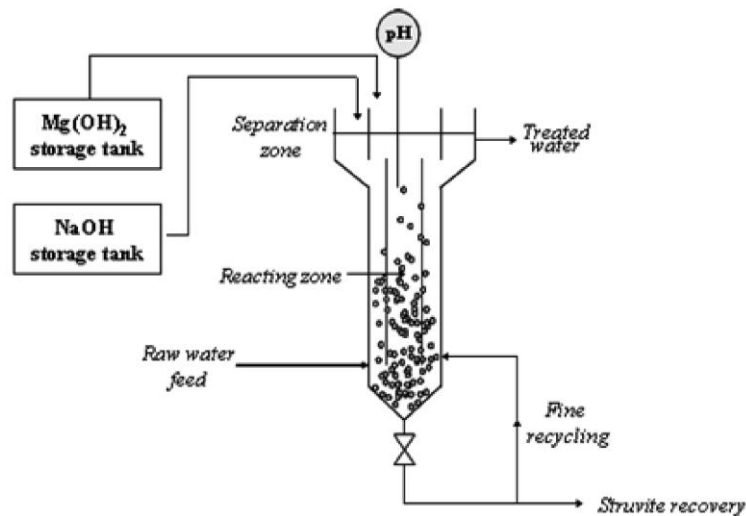


Figura 1.11. Esquema de proceso de cristalización. (Le Corre et al., 2009).

En la Figura 1.11 representa una muestra del esquema del proceso, en donde se consta con un reactor de lecho fluidizado en forma de cilindro, cuyo material importante es la arena de filtro. El agua residual es bombeada para extracción a través del reactor de manera ascendente y, a velocidad alta (40-100 m.hr-1), porque de esa manera el lecho de pellets se mantiene en un estado fluidizado. La cristalización eficaz de fosfato de calcio requiere un pH de 9. Por lo tanto, se añade una solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  al reactor y la dosificación se controla midiendo el pH. Añadiendo  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y controlando la alcalinidad, el fosfato de calcio cristaliza en los núcleos. A medida que los gránulos crecen en tamaño y masa, se hunden hasta el fondo del reactor (Desmidt et al., 2015). A intervalos regulares, una cantidad de los gránulos fluidizados más grandes se descarga a pleno funcionamiento del reactor y se agrega material de semilla fresco (Giensen & Van der Moldeh, 1996). Al seleccionar las condiciones apropiadas del proceso, se minimiza la co-cristalización de impurezas y se obtienen cristales de fosfato de alta pureza (Giesen, 1999).

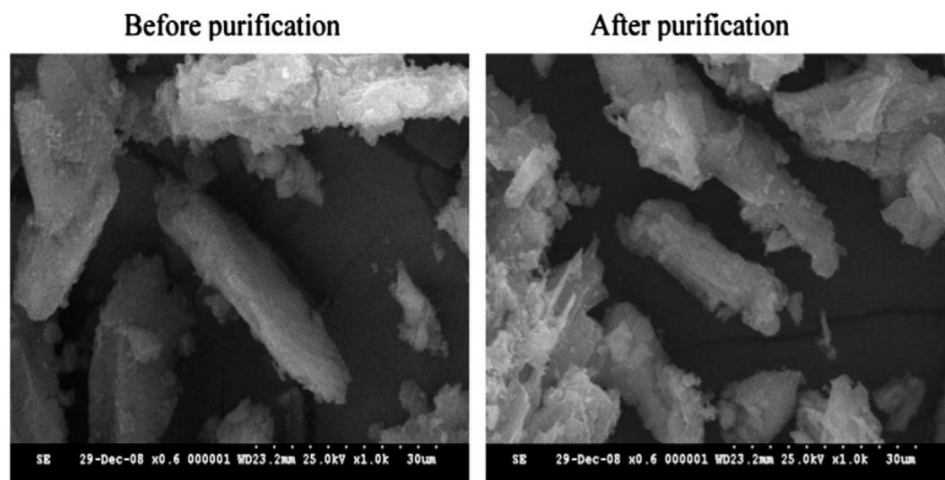


Figura 1.12. Fotografías de cristales de estruvita recuperados. (YingHao Liu et al., 2011)



Figura 1.13. Diferentes tamaños de partículas de estruvita (Urdalen, 2013).

#### **1.4.3.2.2 Tratamiento termoquímico**

El tratamiento termodinámico es un proceso termoquímico que produce fosfato renovable a partir de un material rico en fósforo (cenizas de lodos), removiendo metales pesados y aumentando la biodisponibilidad de los nutrientes contenidos en las cenizas (Desmidt et al., 2015) (ver Figura 1.14). Este proceso comienza con la incineración (mono-incineración) de los lodos a 800-900°C, destruyendo la materia orgánica incluyendo los contaminantes orgánicos. El producto de esta primera incineración es la ceniza de los lodos, la cual tiene un alto contenido de fósforo y otros nutrientes como calcio, magnesio, potasio, etc (Vogel et al., 2013). Es importante considerar que, la ceniza tiene un alto contenido de metales pesados que no es admitido para uso agrícola (Marani et al., 2003).

En el segundo paso se da lugar a un tratamiento termoquímico, donde la ceniza de lodo es mezclada con  $MgCl_2$ ,  $CaCl_2$ ,  $NaCl$  o  $NaSO_4$ , para luego ser expuestos entre 20-30 minutos a una temperatura de 1000°C. El estudio de C. Adam determinó que la mayoría de los metales pesados (mercurio, cadmio, cobre, zinc) de las cenizas de los lodos, en presencia de cloruros, se volatizaban a una temperatura entre 800 y 1000°C (2004). El porcentaje de metales pesados volatizados dependerá de la temperatura y tiempo de exposición, entre mayores sean estos parámetros, mayor cantidad de metales pesados serán volatizados como lo muestra la Figura 1.15 (Adam et al., 2009). La bio-disponibilidad de las cenizas influye en la capacidad que tendrán las plantas de absorber el fósforo y demás nutrientes cuando sea usado como fertilizante. Las cenizas de los lodos sin tratar, a pesar de tener alto contenido

de metales pesados, contiene un fósforo que no es bio-disponible para las plantas, la cual es otra desventaja para la agricultura. Mediante el proceso termoquímico el fósforo es llevado a una fase mineral apta para las plantas, de modo que incrementa la bio-disponibilidad, dependiendo del agente químico utilizado (Gericke, 1968). Con el uso de cloruro de calcio y cloruro de magnesio la bio disponibilidad del producto final es pobre, comparable al de la roca fosfato. Mientras que con sulfato de sodio se alcanza una mejor biodisponibilidad, inclusive es menos costoso y reaccionan más (Hermann & Schaaf, 2019).



Figura 1.14. Esquema de proceso termoquímico. Elaborado por: Autores

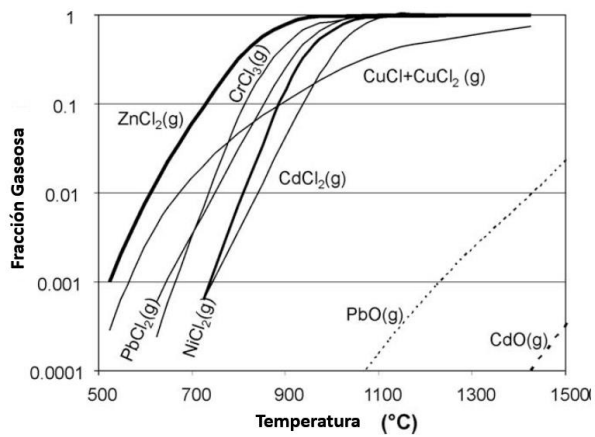


Figura 1.15. Fracción gaseosa de 6 metales pesados en combinación con cloruros (Adam et al., 2009).

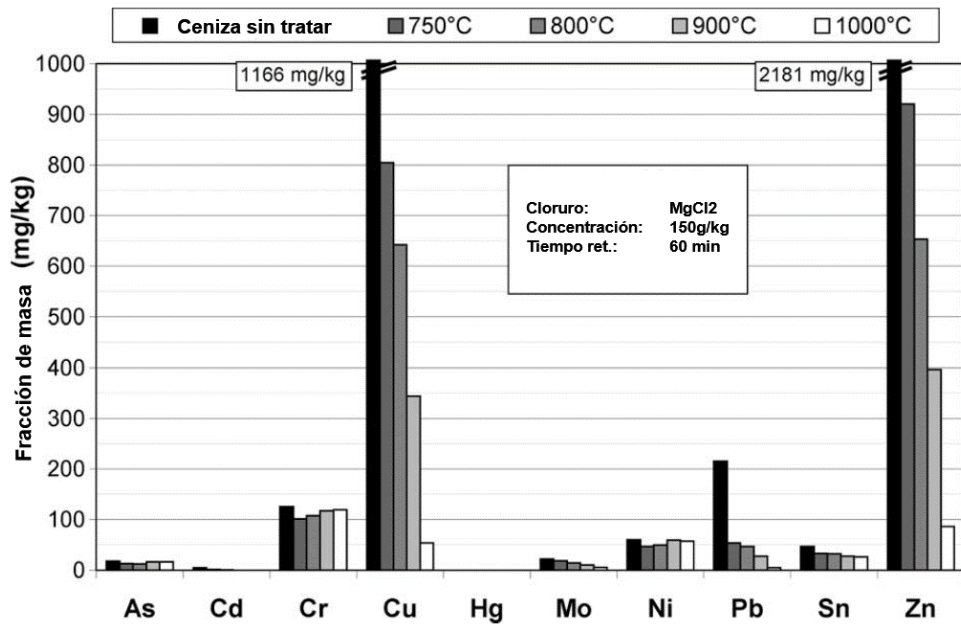


Figura 1.16. Remoción de metales pesados en función de la temperatura (Adam et al., 2009).



Figura 1.17. Fertilizante producido mediante proceso AshDec (Urdalen, 2013).

#### 1.4.4 Sostenibilidad del fósforo y Economía circular

El fósforo recuperado de las aguas residuales y lodos de depuradora es particularmente importante para muchos sectores de la economía. Para poder tener en consideración ampliarse en este ámbito de recuperación, se han propuesto variadas directrices que un país debe tener en cuenta, en base a la experiencia de países europeos como Alemania y Suiza que ya han propuesto soluciones para la gestión sostenible del fósforo, según el modelo de economía circular, como se muestra en la Tabla 1.2 a continuación:

Tabla 1.2. Directrices recomendadas en diferentes ámbitos para gestión sostenible del fósforo (Smol, 2019c). Elaborado por: Autores.

<i>Legal</i>	<i>Financiero</i>	<i>Técnicas y medioambientales</i>	<i>Social</i>
Implementación de requisitos específicos con respecto al uso sostenible de fuentes de fósforo en la economía	Desarrollo de herramientas financieras que apoyen la investigación y el desarrollo en el área de gestión, consumo y reciclaje de recursos	Realización de investigación y desarrollo centrados en la recuperación de nutrientes	Iniciar el diálogo y promover la concienciación entre todas las partes interesadas: los responsables políticos, la industria, el mundo académico, los investigadores y la comunidad sobre las implicaciones de la escasez de P a escala mundial y nacional y las posibles soluciones sostenibles
Desarrollo de propuestas de regulaciones y recomendaciones para los formuladores de políticas	Desarrollo de programas que apoyen la inversión en tecnologías de recuperación de nutrientes	Identificación del potencial de recuperación de P de diferentes corrientes de residuos (el rendimiento de las instalaciones en todo el país y la disponibilidad de P reciclado)	Promoción de las mejores prácticas de gestión del uso sostenible de fósforo entre los marcos locales
Desarrollo de obligaciones legales sobre la	Desarrollo de herramientas que apoyen la	Desarrollo y evaluación de soluciones de ingeniería ambiental que se ocupen de	Educar al público sobre la diversidad de fuentes de P y el potencial para



recuperación de P de diversas corrientes de residuos	comercialización de la investigación y la implementación de las tecnologías de recuperación de nutrientes en el mercado	la recuperación de P de diferentes corrientes de desechos	una buena gestión de P, fomentando el pensamiento circular y desarrollando ideas empresariales relacionadas con este recurso
--	---	---	--

Según lo mostrado, se tiene una idea bastante clara sobre con lo que se podría contribuir al desarrollo de una nueva estrategia de gestión para el uso sostenible del fósforo, teniendo en cuenta factores económicos, técnicos, sociales y medioambientales.

Ahora bien, como se mencionó anteriormente, en los países en desarrollo, la implementación de sistemas de recuperación de nutrientes es un desafío (Lipińska, 2018b), aun si se siguieran las directrices mostradas. Los enfoques de recuperación de recursos no solo pueden mejorar la sostenibilidad de las operaciones de tratamiento de aguas residuales, sino también generando ingresos para el proveedor de servicios públicos (Chripim et al., 2019), ya que dependiendo de la tecnología de recuperación de fósforo utilizada, se puede llegar a un potencial de recuperación estimado de hasta 170 – 250 toneladas de fósforo al año a partir de lodos o cenizas digeridos, como se mostró en el caso estudiado de la depuradora municipal en Sofia, la más grande de Bulgaria (Ribarova et al., 2017). En este contexto, desde la perspectiva de las empresas de fertilizantes u otros, otra motivación para la recuperación de fósforo es la etiqueta de sostenibilidad como herramienta de marketing verde (De Boer et al., 2018). Actualmente, existen certificaciones como Fairtrade, Rainforest Alliance Certified, Intereco, Sohiscert, Marine Stewardship Council, entre otras, que ayudan a diferenciar qué productos cumplen con estándares de calidad en su origen, siembra y proceso de comercialización (Mateo, 2019).

Debido a la situación mundial de estos dos últimos años, ha sido aún más notorio lo perjudicial del actual modelo lineal de producción y consumo, basado en usar y desechar. En el Ecuador, se maneja aun la economía basada en la extracción y uso de materiales desde un modelo lineal para incrementar su Índice de Desarrollo Humano y su Producto Interno Bruto (*Libro Blanco de Economía Circular de Ecuador*, 2021). Enfocándose en la economía lineal del fósforo y centrando el

tema en el origen, es pertinente saber que la extracción de depósitos de roca fosfórica ha sido la forma dominante de alimentar el ciclo de uso de fósforo, sin embargo, la minería no debe verse como el único mecanismo de alimentación de los recursos primarios de fósforo (Hermann et al., 2018). Históricamente, la principal fuente de fósforo fueron los huesos humanos y animales, así como las excretas de aves, algo así de natural. A partir de esto, se conoce que su cadena de suministro incluye actividades de exploración, extracción y beneficio, siendo esta última distintos procesos para producir elementos de mercado como fertilizantes de varios tipos (Geissler et al., 2018).

En este último siglo la población ha crecido exponencialmente de 1.65 billones a más de 7 billones (ver Figura 1.18). Este crecimiento dramático de la población ha llevado al mismo tiempo a una era de consumo masivo donde se utiliza, extrae y explota materia prima sin un plan de recuperación de esta. La economía circular busca que las fuentes futuras involucren la recuperación masiva económicamente viable de lodos de aguas residuales o fuentes actualmente inimaginables o desconocidas (Hannington et al., 2017). En este intento de recuperación del fósforo, es posible que muchos átomos de P nunca alcancen el ciclo de uso de fósforo agrícola, como se puede observar en la Figura 1.19.

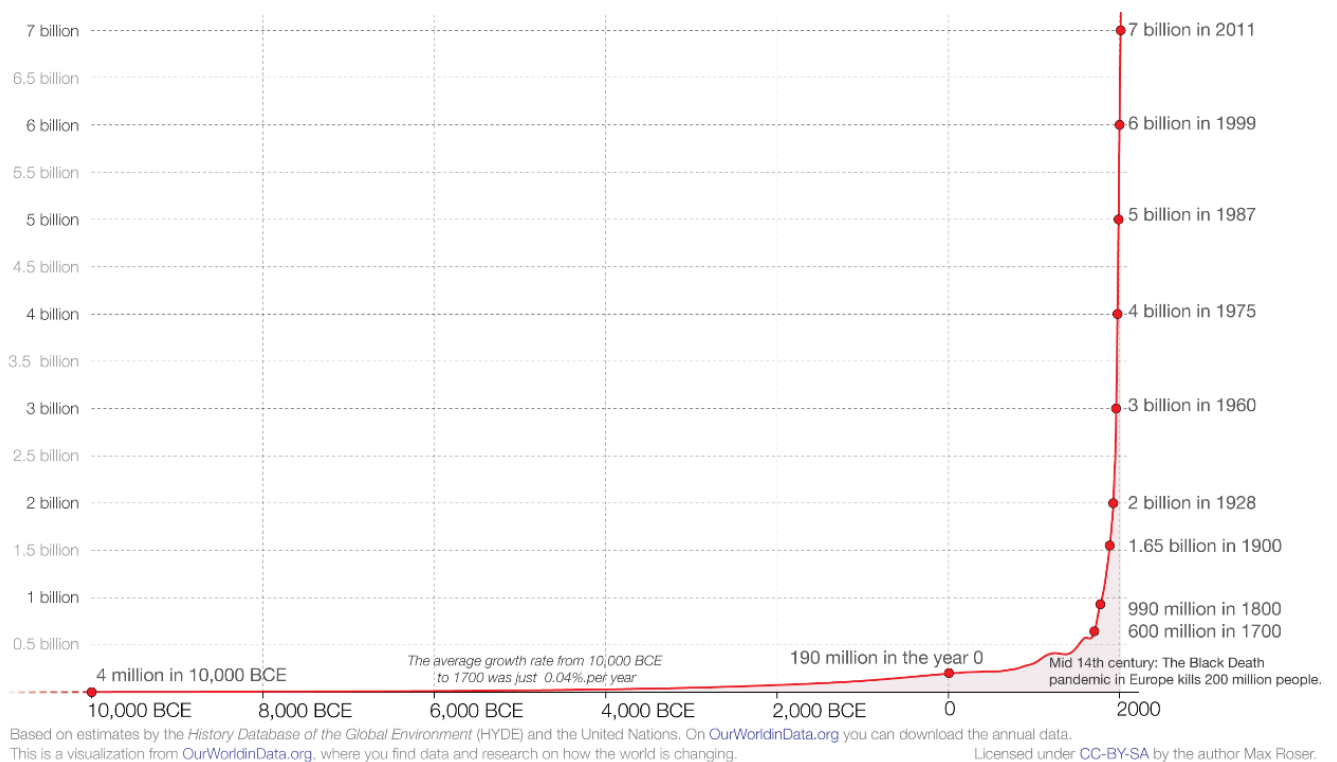


Figura 1.18. Tamaño de la población mundial durante los últimos 12000 años (Roser et al., 2013).

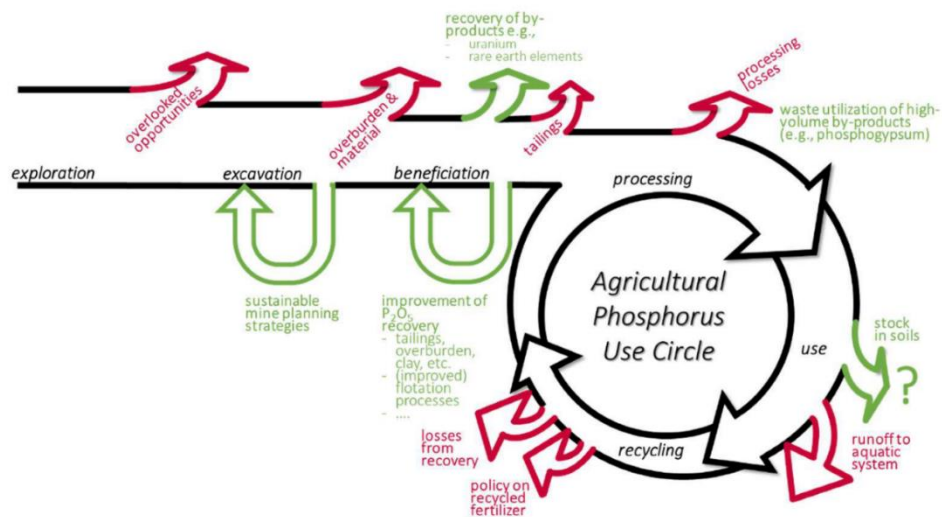


Figura 1.19. Principios para avanzar hacia una economía circular del fósforo. (Geissler et al., 2018)

La Figura 1.19 presenta los flujos de fósforo, así como también las pérdidas a lo largo de la cadena de suministro. Las flechas negras indican flujos, las rojas indican pérdidas potenciales, y las verdes son el potencial de recuperación mediante el cierre de bucles. Es por esto por lo que se enfatizan las diversas tecnologías y fuentes de recuperación, para que se pruebe la manera de obtener la mayor cantidad de nutriente recuperado en un proceso.

#### 1.4.4.1 Modelos de negocio

Hasta el día de hoy, los principales depósitos de roca fosfórica, siendo esta la materia prima principal, en Latinoamérica pueden ser hallados en Brasil, Venezuela, Colombia, México, Chile, Perú y Ecuador. Ahora, existe la oportunidad y necesidad de hacer crecer la productividad de la agricultura del continente, esto causará un crecimiento en la utilización de fertilizantes, considerando las altas posibilidades de desarrollo debido al gran potencial en cada país (Vega, 2006).

Una vez establecida la oportunidad del negocio y habiendo mencionado la rama de la economía circular y su importancia para el tema en cuestión, es necesario entender el lienzo del “Modelo de Negocio de Triple Capa” (TLBMC por sus siglas en inglés). En este se critican dos capas adicionales a las del modelo de negocio común, con el fin de explorar la innovación, cualquiera que esta sea, orientándola a la sostenibilidad. Estas capas son la capa ambiental y la social, que se basan

en la representación del ciclo de vida y de las partes interesadas (Joyce & L.Paquin, 2016a).

#### 1.4.4.1.1 **Ámbito ambiental**

Esta capa resulta tras la indagación y la práctica sobre evaluaciones del ciclo de vida (LCA), lo cual presenta un guía formal para la medición de los impactos ambientales de un producto o servicio en todas las etapas de su vida (Joyce & L.Paquin, 2016b). En este análisis se busca proporcionar una valoración de las consecuencias ambientales a través de múltiples tipos de indicadores, sobre el ciclo de vida completo de un producto o servicio (Guinee, 2002). Aunque el TLBMC no integra un LCA formal en el lienzo, sí garantiza una perspectiva del ciclo de vida al considerar un modelo comercial y sus impactos ambientales.

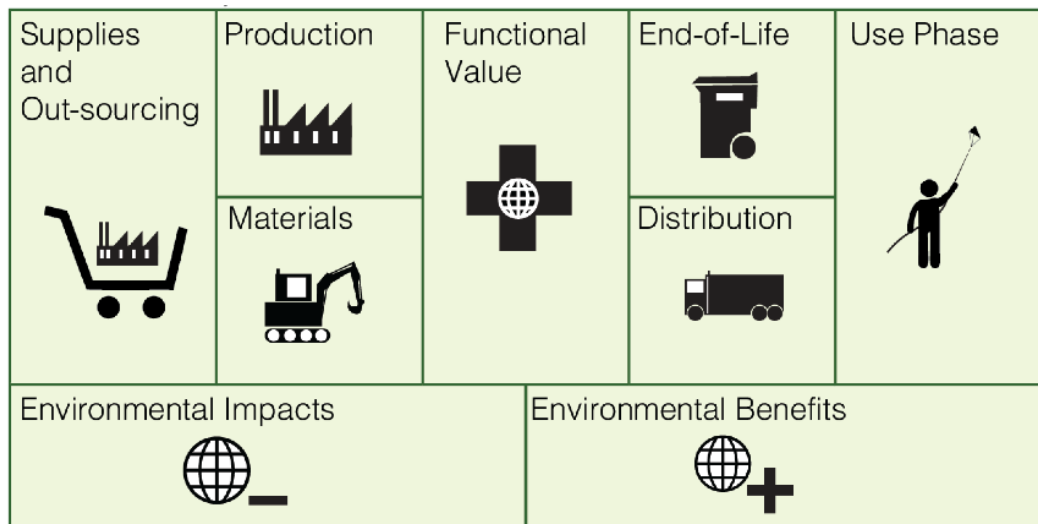


Figura 1.20. Lienzo del modelo de negocio del ciclo de vida ambiental con sus componentes. (Florian, 2015a)

#### 1.4.4.1.2 **Ámbito social**

Esta capa se enfoca en la de gestión de partes interesadas para explorar el impacto social de una organización (Freeman & McVea, 2001). Tiene como fin dar una buena proporción a los intereses de los interesados de una organización, en vez de solo buscar el máximo beneficio para la organización en sí. Se consideran partes interesadas aquellos grupos de personas u organizaciones que pueden influir o son influenciados por las acciones de una organización (Hart & Sharma, 2004). Dado que las partes interesadas particulares de una organización pueden variar según el contexto y la

prominencia (Mitchell et al., 1997), la capa de partes interesadas tiene un uso amplio y flexible. Esta capa se enfoca en la de gestión de partes interesadas para explorar el impacto social de una organización (Freeman & McVea, 2001). Se consideran partes interesadas aquellos grupos de personas u organizaciones que pueden influir o son influenciados por las acciones de una organización (Hart & Sharma, 2004). Dado que las partes interesadas particulares de una organización pueden variar según el contexto y la prominencia (Mitchell et al., 1997), la capa de partes interesadas tiene un uso amplio y flexible.

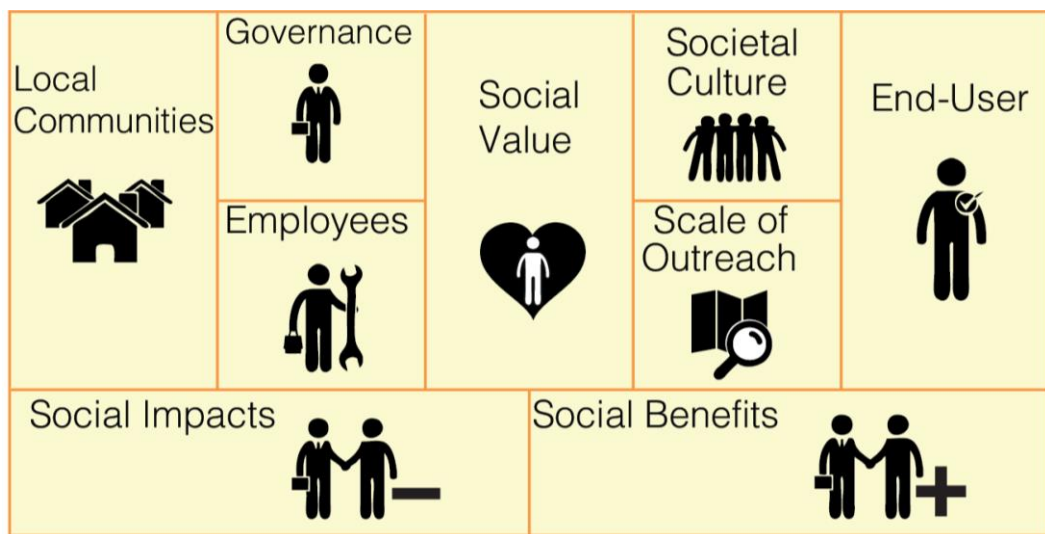


Figura 1.21. Lienzo del modelo de negocio de los actores sociales con sus componentes.  
(Florian, 2015b)

Al analizar las tres capas del modelo de negocio paralelamente, se hace más directa la manera en la que una organización crea múltiples valores: económico (propuesta de valor), medioambiental (valor funcional) y social (valor social).

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Revisión bibliográfica

Como parte fundamental del desarrollo de este estudio se realizó una revisión bibliográfica enfocándola al fósforo, formas de recuperación del fósforo, sostenibilidad y economía circular. Un resumen de la revisión bibliográfica realizada se encuentra en el marco teórico de la sección 1.4.

En esta etapa se determinó el estado crítico de las fuentes de fósforo, las metodologías de recuperación de este elemento y como incluirlo en un ciclo de economía circular.

### 2.2 Muestreo

Después de realizar la revisión bibliográfica, se pudo replantear la etapa de recolección de muestras, ya que se definió que no era necesario realizar muestreo en cada proceso, sino en la etapa de generación de lodos. Para determinar qué tan factible es recuperar fósforo de aguas residuales es importante cualificar la composición del agua residual municipal. Por ende, se realizó un muestreo y análisis del agua donde se pudo precisar el contenido de fósforo y otros parámetros importantes que influyen en un proceso de recuperación de lodo en una planta de tratamiento. Es importante establecer que para este procedimiento se debe tomar en cuenta puntos estratégicos de muestreo, donde se pueda cuantificar concentraciones y porcentajes de remoción de fósforo. Estos puntos de muestreo pueden ser básicamente el agua residual sin tratar, es decir en la entrada de la planta, y también en puntos antes y después del proceso de generación de lodos. Para este caso se realizó el muestreo en la planta de tratamiento de aguas residuales de biorreactor de membrana (MBR) ubicada en el núcleo de ingenierías en ESPOL. Debido a que la planta no presenta planos ni manual técnico, se realizó un muestreo limitado a las capacidades de la PTAR. Sin embargo, se tomaron muestras duplicadas (dos en cada punto) en la entrada de agua residual y en la salida de agua tratada de la planta MBR mencionada anteriormente. Se tomaron muestras duplicadas con el fin de poder corroborar que los resultados son coherentes en un mismo punto; y, además, los análisis se realizaron el mismo día

del muestreo para evitar variaciones, en comparación si las muestras se hubieran almacenado durante más tiempo.

### 2.2.1 Normativa y procedimientos

Como se indicó anteriormente, es necesario saber la composición y parámetros físicos, químicos y bioquímicos del agua en las distintas etapas de interés. En función de los parámetros y la composición se puede determinar qué metodología de recuperación es la más adecuada.

En este estudio se realizaron los siguientes ensayos bajo la normativa Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Federation & APH Association, 2017):

Tabla 2.1. Ensayos realizados en laboratorio y metodología seguida. Elaborado por: Autores.

<b>Ensayo</b>	<b>Metodología</b>
<i>pH</i>	SM 4500 H+ B
<i>Conductividad Eléctrica (CE)</i>	SM 2510 B
<i>Oxígeno Disuelto (OD)</i>	SM 4500-O H
<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	SM 5220 D
<i>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</i>	SM 2540 D
<i>Sólidos sedimentables con Cono de Imhoff</i>	SM 2540 F
<i>Fosfatos</i>	Hach 8178, adaptado de SM 4500 P-C

Para el análisis de los fosfatos, se rigió el procedimiento al método Hach 8178, a su vez basado en la normativa mencionada, siguiendo el método de aminoácidos.

### 2.3 Selección preliminar

Mediante revisión bibliográfica de comparación de tecnologías de recuperación de fósforo se discernieron las tecnologías en relación con la cantidad de fósforo recuperado, energía requerida y costos de operación. En esta revisión se definió que dependiendo del estado del lodo que se use como fuente de recuperación un proceso tendrá mayor o menor magnitud con respecto a los parámetros mencionados anteriormente.

Se descartaron los procesos que utilizan lodo deshidratados o secado ya que estos requieren de un alto OPEX y energía para recuperar mediana cantidad de fósforo (ver Figura 2.1). Por otro lado, también se reconocieron que los procesos

termoquímicos, que utilizan cenizas de lodos como input, se destacaban por tener un grado de recuperación mayor al de los demás evaluados en la bibliografía. Este tipo de proceso tienen un OPEX relativamente bajo, sin embargo, debido al uso de incineración y hornos demandan de más energía con relación a los procesos de precipitación y cristalización (2.3 veces más). A pesar de su bajo porcentaje de recuperación, los procesos de precipitación o cristalización son los que menos energía consumen en sus procesos y tienen gastos operativos relativamente bajos. Este último tipo de proceso, que usa la fase líquida de los lodos, suele ser el más atractivo por sus facilidades económicas, sin embargo, los procesos termoquímicos no se quedan atrás. Los procesos termoquímicos tienen el beneficio ambiental superior de reducir el volumen de los lodos convirtiéndolo en ceniza, en más de un 90% (Jupp et al., 2021), mediante incineración. Reduciendo de gran manera el volumen de lodos, a la vez se evita la gestión de la disposición final, que por lo general es inadecuada, además de mediante este proceso se consigue alto porcentaje de recuperación de P.

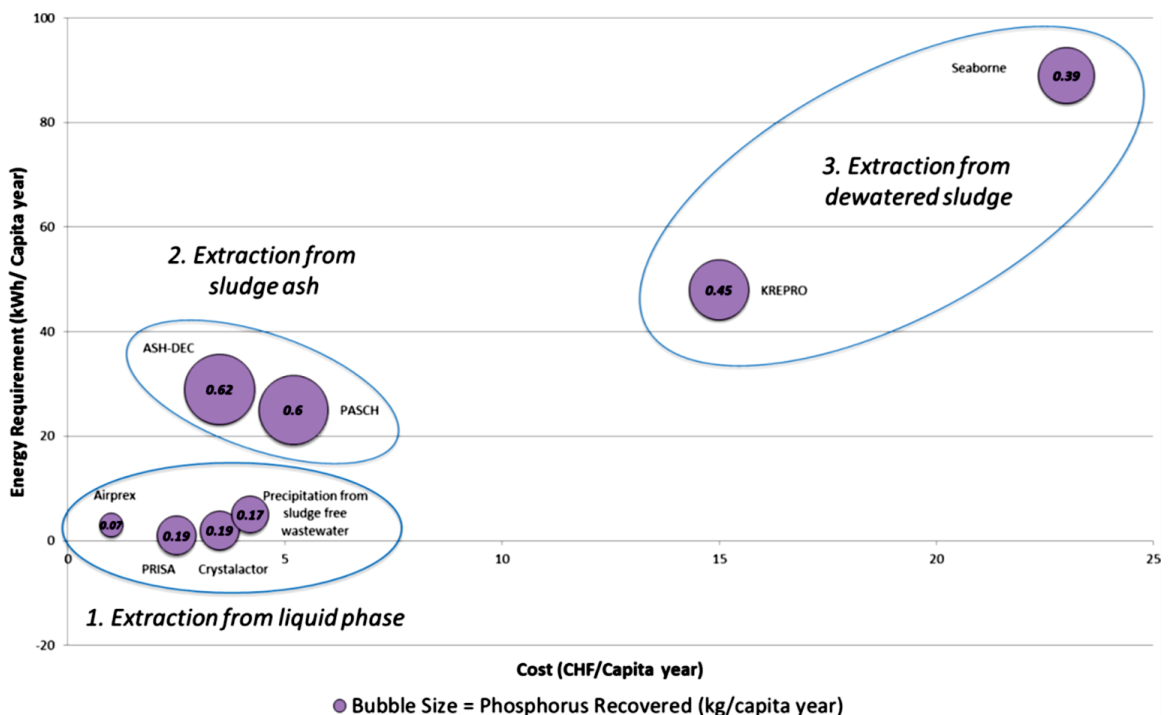


Figura 2.1. Energía requerida vs. costos totales (CHF=franco suizo~US\$) de diferentes tecnologías que recuperan fósforos. (Mayer et al., 2016).



A partir de la Figura 2.1, se infiere como el costo se basa en condiciones suizas e incluye el costo de personal, operación, materia prima, energía y pagos de interés. En la energía requerida se considera gas, electricidad, energía térmica requerida para producir la materia prima.

De manera preliminar se escogieron los procesos Crystalactor y AshDec Rhenania (de aquí en adelante: AshDec), debido a los beneficios que conllevan con respecto a la energía requerida, costo de operación y recuperación de fósforo. Para tener una visión más clara, y poder evaluar otros aspectos de las tecnologías escogidas, se realiza un modelo de análisis de ciclo de vida mediante el software libre OpenLCA.

## **2.4 Modelado de procesos**

El fin de este estudio es evaluar el ciclo de vida para analizar las emisiones potenciales y la demanda energética generadas por las diferentes tecnologías de recuperación de fósforo. Ingresando las entradas y salidas adecuadas para cada sistema, el software OpenLCA se encarga de incorporar todos los impactos relacionados no solo del proceso específico en cuestión, sino también antes y después del uso de dicha tecnología. Es importante establecer que el volumen de control para estos análisis es netamente el proceso de recuperación, por lo que, en las entradas de ambos procesos no se incluyen ni el agua residual, ni la ceniza no tratada, que provienen de los procesos anteriores en la cadena de depuración de aguas residuales.

Se eligió el método ReCiPe midpoint (H) para obtener los resultados de las diferentes categorías de análisis, con lo que se consigue comparar expresan la severidad relativa de los impactos ambientales de tecnologías y usos de materiales, en este caso, de dos procesos bastante diferentes como es el proceso de cristalización y el proceso termoquímico.

### **2.4.1 Proceso de cristalización Crystalactor**

La tecnología en la cual se basó el modelado del proceso de cristalización es el llamado Crystalactor. En la Tabla 2.2 a continuación, se enlistan las entradas del proceso con su demanda.

Tabla 2.2. Valores de entrada de demanda de recursos para proceso de cristalización.

Elaborado por: Autores. (Egle et al., 2016)

	<b><i>Demanda de recurso</i></b>	<b><i>Unidad</i></b>	<b><i>Fuente</i></b>
<i>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i>	1.3	[kg/kg P <sub>recuperado</sub> ]	
<i>Ácido acético</i>	0.9 – 1.1	[kg/kg P <sub>recuperado</sub> ]	(Egle et
<i>Ca (OH)<sub>2</sub></i>	6.8	[kg/kg P <sub>recuperado</sub> ]	al., 2016)
<i>NaOH</i>	0.9	[kg/kg P <sub>recuperado</sub> ]	
<i>Arena</i>	0.2	[kg/kg P <sub>recuperado</sub> ]	
<i>Electricidad</i>	5.1	[kWh/kg P <sub>recuperado</sub> ]	

Como se muestra, dado que las cantidades utilizadas de los diferentes materiales recuperados vienen determinadas predominantemente por su contenido de fósforo, las tecnologías se compararon en función de una unidad funcional de 1 kg de fósforo recuperado (1 kg P<sub>recuperado</sub>).

Es importante resaltar que, aunque el proceso de análisis es el de cristalización, en el proceso macro de recuperación de fósforo interviene la comercialización del producto obtenido, por lo que, se decidió incluir en el modelo el proceso de empaquetado y transporte. Para obtener este valor de entrada fue considerado la distancia promedio entre ciudades representativas del comercio ecuatoriano, Guayaquil-Quito, Guayaquil-Manta, que un camión de 8 toneladas viajaría. Para este proceso su ingresaron las siguientes entradas:

Tabla 2.3. Valores de entrada de demanda de recursos para proceso de Empaquetado y transporte. Elaborado por: Autores.

	<b>Demanda de recurso</b>	<b>Unidad</b>
<i>Saco 1 ton de Polipropileno</i>	0.00176	[kg/kg P <sub>recuperado</sub> ]
<i>Transporte</i>	2522.80	[ton*km]
<i>Electricidad</i>	0.00044	[kWh/kg P <sub>recuperado</sub> ]

### 2.4.2 Proceso termoquímico AshDec

El proceso termoquímico seleccionado en este estudio es AshDec, el cual fue modelado tomando en consideración el estudios previos de comparación de estudios de tecnología de recuperación de fósforo (Egle et al., 2016; Hermann & Schaaf, 2019). En la Tabla 2.4 se indican los recursos, energía y subproductos usados en el proceso en cuestión, y que serán utilizados en el modelo para el análisis de ciclo de vida.

Tabla 2.4. Valores de entrada de demanda de recursos para proceso AshDec. Elaborado por: Autores. (Egle et al., 2016; Hermann & Schaaf, 2019)

	<b>Demanda de recurso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Fuente</b>
<i>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i>	4.386	[kg/kg P <sub>recuperado</sub> ]	
<i>Ca (OH)<sub>2</sub></i>	0.237	[kg/kg P <sub>recuperado</sub> ]	(Egle et al., 2016)
<i>Aire</i>	21.339	[kg/kg P <sub>recuperado</sub> ]	
<i>Electricidad</i>	7.706	[kWh/kg P <sub>recuperado</sub> ]	
<i>Gas</i>	4.268	[kWh/kg P <sub>recuperado</sub> ]	
		<b>Subproducto</b>	<b>Unidad</b>
<i>Filter cake</i>	0.041	[kg/kg P <sub>recuperado</sub> ]	

En este caso el estudio de Egle, se presentaban los datos de input y output de los procesos en función de kg de ceniza no tratada. Por esa razón se realizó la conversión para obtener la información con respecto a kg de fósforo recuperado (1 kg P<sub>recuperado</sub>), como unidad funcional.

Al igual que en el proceso de cristalización, se tomó en cuenta la comercialización del fósforo. En la siguiente Tabla 2.5 se presenta la información relacionada al modelado de los procesos de empaquetado y transporte:

Tabla 2.5. Valores de entrada de demanda de recursos para proceso de Empaquetado y transporte. Elaborado por: Autores

	<b><i>Demanda de recurso</i></b>	<b><i>Unidad</i></b>
<i>Saco 1ton de Polipropileno</i>	0.00313	[kg/kg P <sub>recuperado</sub> ]
<i>Transporte</i>	2522.80	[ton*km]
<i>Electricidad</i>	0.00078	[kWh/kg P <sub>recuperado</sub> ]

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Tabulación de datos de laboratorio

Una vez realizados todos los ensayos mencionados, se presenta a continuación las tablas con resumen de los valores obtenidos en laboratorio:

Tabla 3.1. Parámetros caracterizados y resultados obtenidos. Elaborado por: Autores.

<b>Planta MBR Ingenierías</b>		<b>Entrada</b>		<b>Salida</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>E1<sup>(1)</sup></b>	<b>E2<sup>(2)</sup></b>	<b>S1<sup>(3)</sup></b>	<b>S2<sup>(3)</sup></b>
<i>pH</i>	-	7,43	7,46	7,42	7,44
<i>CE</i>	μS/cm	333,0	333,0	296,0	299,0
<i>OD</i>	mg O <sub>2</sub> /l	1,61	1,42	4,08	4,41
<i>DQO</i>	mg O <sub>2</sub> /l	19,00	19,00	37,00	32,00
<i>Fosfatos</i>	mg PO <sub>4</sub> /l	10,38	11,12	11,92	12,30
<i>SST</i>	mg/l	20,00	12,00	28,00	40,00

*Se realizaron 2 muestras en el punto de entrada y 2 muestras en la salida de la planta MBR de ESPOL.*

<sup>(1)</sup> E1: Muestra 1 en la entrada de la planta MBR

<sup>(2)</sup> E2: Muestra 2 en la entrada de la planta MBR

<sup>(3)</sup> S1: Muestra 1 en la salida de la planta MBR

<sup>(4)</sup> S2: Muestra 2 en la salida de la planta MBR

Tabla 3.2. Resultados obtenidos en Test de Jarras. Elaborado por: Autores.

<b>Test de Jarras con Cono de Imhoff</b>				
<i>Concentración de coagulante [mg/l]</i>	40,00	80,00	120,00	160,00
<b>Entrada</b>	<b>Ea</b>	<b>Eb</b>	<b>Ec</b>	<b>Ed</b>
<i>Sólidos Sedimentables[ml/l]</i>	1,5	6,25	17,5	26,25
<b>Salida</b>	<b>Sa</b>	<b>Sb</b>	<b>Sc</b>	<b>Sd</b>
<i>Sólidos Sedimentables[ml/l]</i>	5,25	16,25	21,25	32,5

*Nota: Las muestras Ea, Eb, Ec, Ed, Sa, Sb, Sc y Sd corresponden a las muestras de entrada y salida según la dosificación de coagulante.*

Mediante los resultados mostrados en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se pudo conocer que la planta de MBR en ESPOL no estaba operando de manera correcta ya que los parámetros como DQO, Fosfato, sólidos suspendidos y SST eran mayores en la salida con respecto a la entrada. Adicionalmente, a través de una visita técnica el

personal encargado declaró que la planta no ha recibido el mantenimiento adecuado.

Con respecto a los fosfatos, se identificó que el contenido de este en las aguas de entrada, al tener más de 10 mg/L, tiene un valor aceptable de potencial de recuperación, según lo afirma Smol en su estudio (2019). Es necesario resaltar que, al momento se está haciendo la comparación bajo un parámetro enfocado a las aguas depuradas, sin embargo, más adelante se podrá realizar el análisis bajo el parámetro enfocado en los lodos de depuración de la planta, en donde se puede llegar a alcanzar porcentaje de potencial de recuperación aún más altos.

### 3.2 Tabulación de datos externos

Para un análisis más exhaustivo sobre el tema en cuestión se decidió solicitar información a una entidad pública que maneje la caracterización de aguas residuales de diferentes ciudadelas de Guayaquil. Los datos recibidos fueron lo más recientes procesados del 2021, desde enero hasta julio, solo abarcando descargas residenciales, es decir, se descarta totalmente efluentes industriales con otro tipo de compuestos.

Para poder procesar la información se decidió zonificar en subgrupos según la ubicación de los puntos analizados, presentados en la Tabla 3.3, como se muestra en la figura a continuación:

Tabla 3.3. Zonificación de puntos analizados. Elaborado por: Autores

ZONAS	ESTACIÓN	COORDENADAS	
		ENTRADA	SALIDA
1	Puerto Hondo	0608364;9757657	0608379;9757633
	Valle Alto	0604949;9756286	0604948;9756273
	Ciudad Olimpo	0602222;9753696	0602182;9753637
	Puertas Seymour	0610601;9758148	0610610;9758189
	Laguna Club 2	0612359;9757915	0612372;9757885
	Laguna Club 1	0612359;9757919	0612891;9757905
	Terranostra 1	0611112;9758517	0611163;9758536
	Terranostra 2	0611405;9758478	0611419;9758455
	Portovita	0612722;9758753	0612706;9758739
	Vía al Sol	0610383;9757585	0610375;9757546
	Arcadia	0610927;9758199	0610901;9758200
	Belo Horizonte	0612956;9758060	0612943;9758077

2	Costalmar	0610560;9758144	0610561;9758119
	Loma Vista	0617336;9768434	0617344;9768418
	Porton Beata	0616221;9772218	0616230;9772252
	Caracol	0618070;9769183	0618050;9769194
	Totori	0617972;9769496	0617975;9769524
	Colina del Sol 1	0618097;9768361	0618103;9768349
	5 de diciembre	0617335;9771277	0617343;9771240
3	Metropolis 1	0621180;9771460	0621172;9771477
	Metropolis 2	0620779;9771753	0620776;9771743
	Metropolis 3	0620482;9771687	0620515;9771690
	Metropolis 4	0620177;9771948	0620175;9771962
	Guayaquil 2	0620601;9772206	0620578;9777222
4	Socio Vivienda 1	0615157;9764158	0615173;9764183
5	Laguna Mi Lote	0613368;9773271	0612914;9773407
6	Ciudad Santiago	0618055;9776596	0618109;9776616

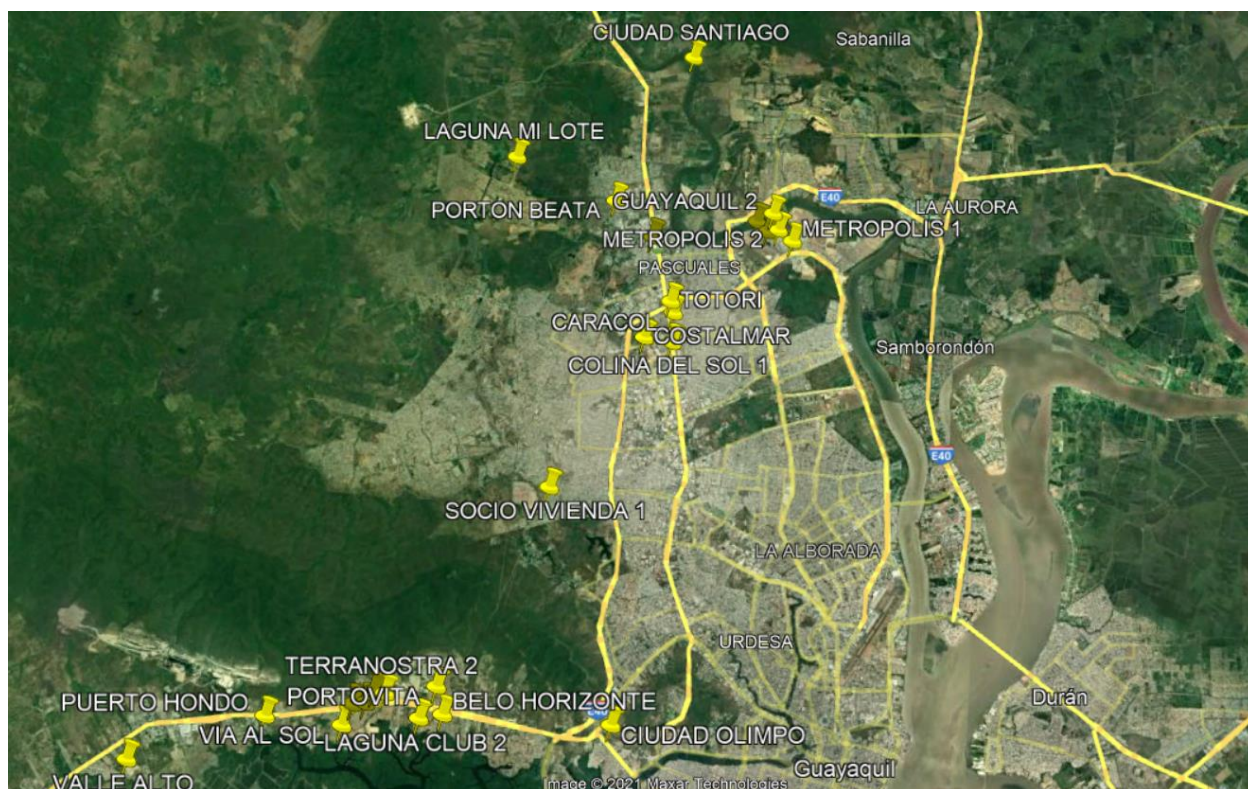


Figura 3.1. Ubicación de residencias con efluentes analizados. Elaborado por: Autores.

A partir de esto, se obtuvieron los siguientes gráficos, que muestran los valores obtenidos en parámetros como fósforo, DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos suspendidos y coliformes fecales, tanto de entrada como de salida, en cada punto analizado.

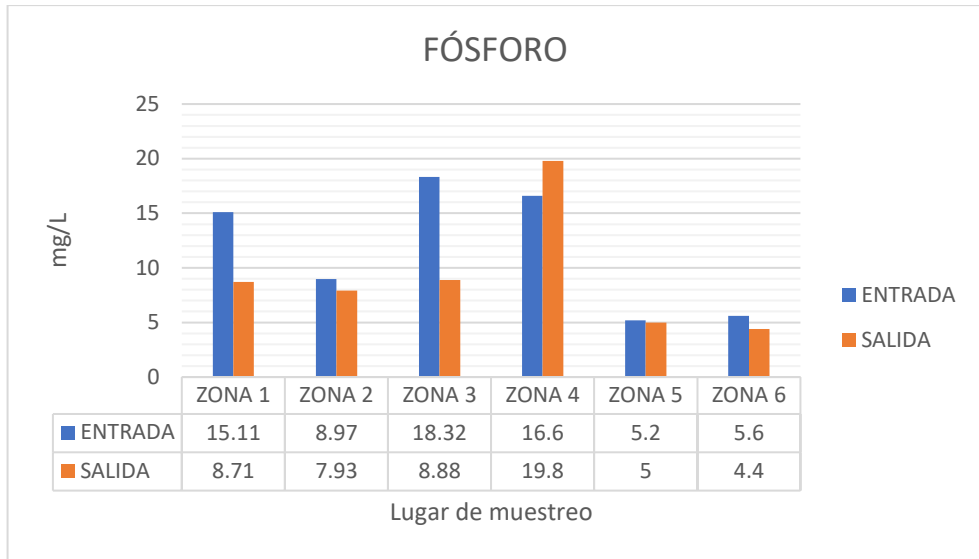


Figura 3.2. Valores de fósforo por cada zona. Elaborado por: Autores.

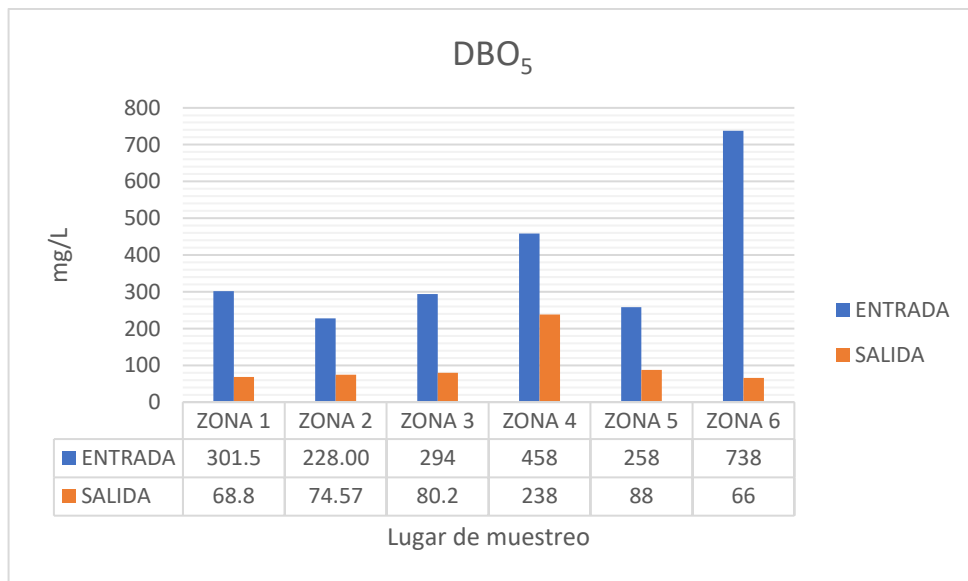


Figura 3.3. Valores de DBO<sub>5</sub> por cada zona. Elaborado por: Autores.



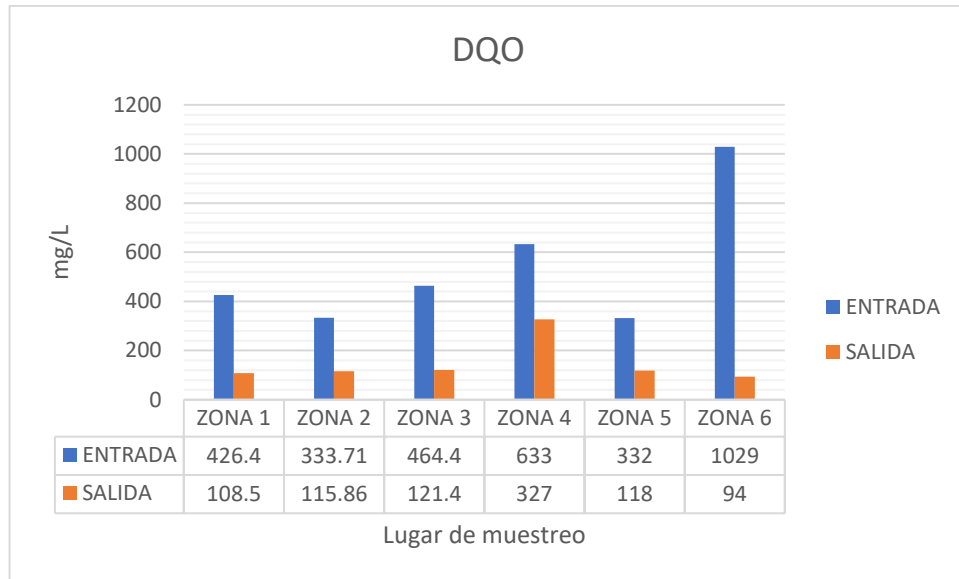


Figura 3.4. Valores de DQO por cada zona. Elaborado por: Autores.

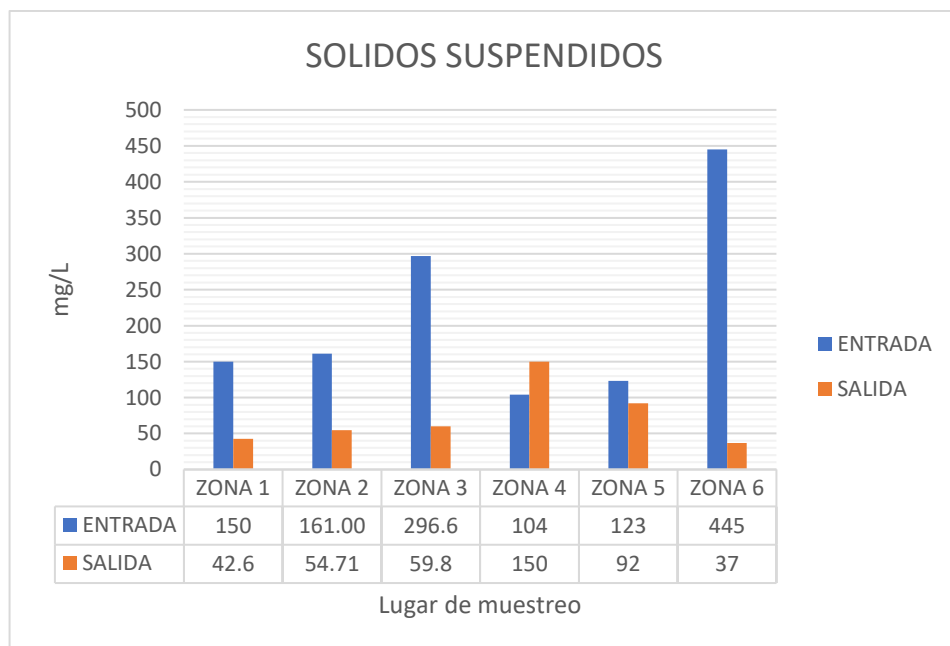


Figura 3.5. Valores de Sólidos Suspendidos por cada zona. Elaborado por: Autores.

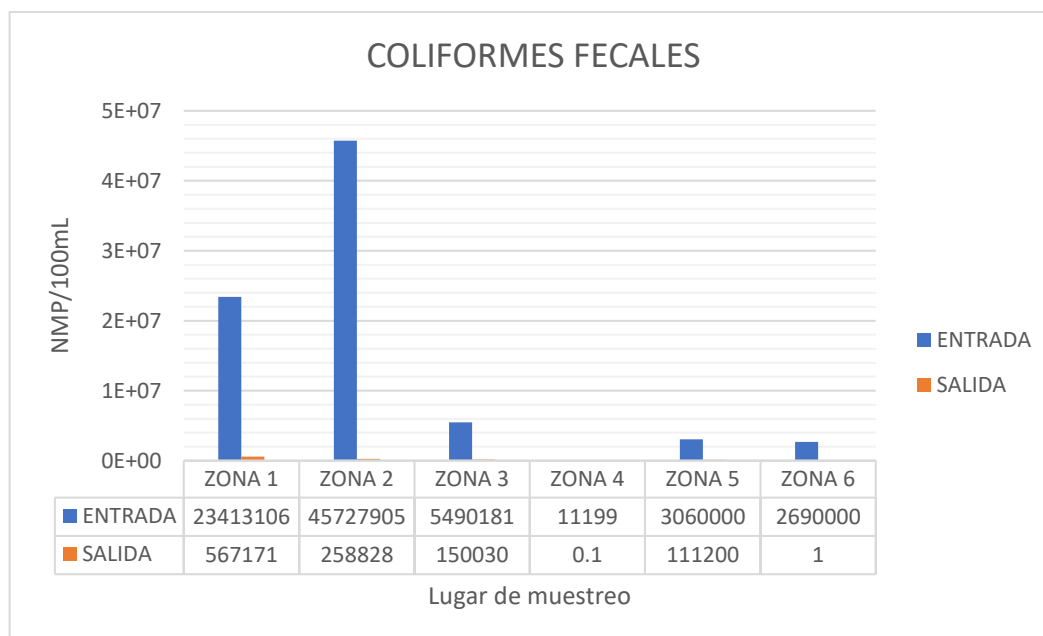


Figura 3.6. Valores de Coliformes Fecales por cada zona. Elaborado por: Autores.

A partir de lo mostrado en la Figura 3.2, de la concentración de fósforo, se puede ver que en las zonas 5 y 6 tienen baja concentración de fósforo. Además, tienen la singularidad de que están ubicadas en la periferia de la zona urbana de Guayaquil (ver Figura 3.1). Se podría inferir que en estos casos hay una filtración de aguas lluvias, ya que estas muestras son tomadas en un mes de invierno. De manera general, el resto de las zonas presentan concentraciones que podrían ser óptimas para aplicar procesos de recuperación de fósforo. Otra particularidad es que en la zona 4 no hay una remoción del fósforo adecuada, y por ende, no cumple con el límite de fósforo total permisible para descargar al sistema alcantarillado municipal (15 mg/L), ni a cuerpos de agua dulce y marina (10 mg/L).

Con respecto a los demás parámetros, solo la zona 4 no cumpliría con los límites permisibles en el caso de descargar en cuerpos de agua dulce o marina. Por otro lado, si cumple con los límites permisibles para descargar en el sistema de alcantarillado municipal.

### 3.3 Resultados de software OpenLCA

Una vez ingresados los procesos mencionados en 2.4.1 y 2.4.2 a los flujos creados, se obtuvieron los modelos gráficos, como se muestra en las figuras a continuación:

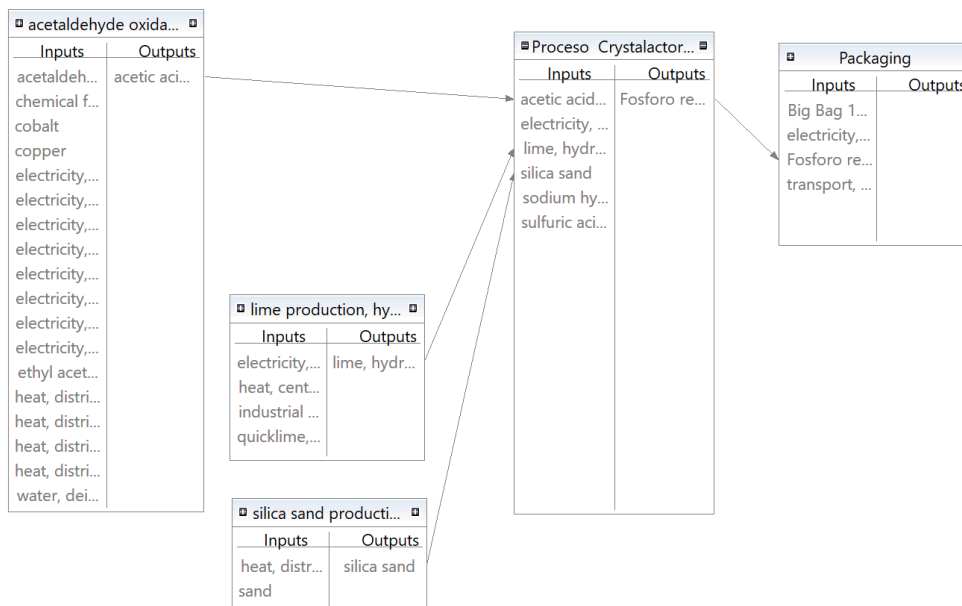


Figura 3.7. Modelo gráfico del proceso de cristalización Crystalactor. Elaborado por: Autores.

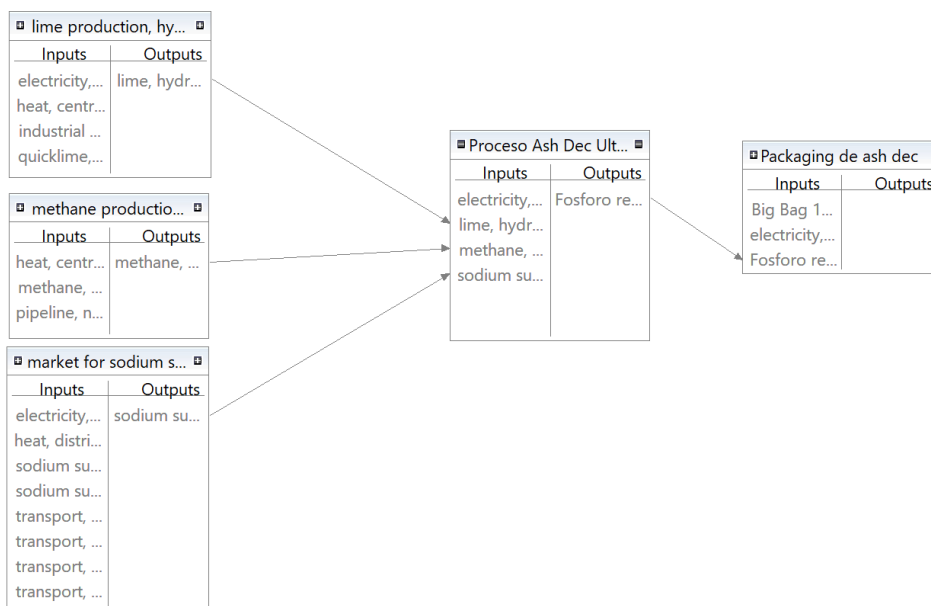


Figura 3.8. Modelo gráfico del proceso termoquímico AshDec. Elaborado por: Autores.

Con el método ReCiPe midpoint (H) se obtuvieron los resultados de las diferentes categorías de análisis.

Tabla 3.4. Resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida. Elaborado por:  
Autores.

<i>Indicador</i>	<i>Crystalactor</i>	<i>AshDec</i>	<i>Unidad</i>
<i>Ecotoxicidad en agua dulce</i>	8.36784e-2	2.22585e-1	kg 1,4-DCB
<i>Eutrofización de agua dulce</i>	8.64596e-4	2.31015e-3	kg P eq
<i>Calentamiento global</i>	9.02619e+0	4.66721e+0	kg CO2 eq
<i>Toxicidad cancerígena humana</i>	8.97970e-2	2.02151e-1	kg 1,4-DCB
<i>Ecotoxicidad marina</i>	1.11577e-1	3.20872e-1	kg 1,4-DCB
<i>Eutrofización marina</i>	5.91844e-5	2.10483e-4	kg N eq
<i>Consumo de agua</i>	1.04557e-1	1.08315e-1	m3

La Tabla 3.4 muestra los resultados de todas las variantes del proyecto. Cada categoría del programa seleccionada se muestra en las filas y las variantes del proyecto en las columnas. La unidad es la unidad de la categoría LCIA (Life cycle impact assessment) como se define en el método LCIA. A continuación, se presentan los gráficos de las categorías de análisis de interés para este estudio.

- **Ecotoxicidad del agua dulce**

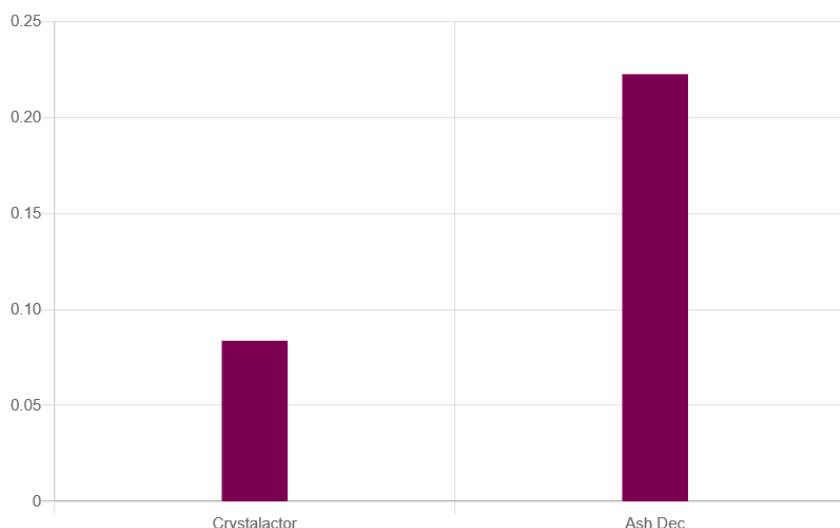


Figura 3.9. Comparación de categoría de análisis Ecotoxicidad del agua dulce en unidades kg 1,4-DCB. Elaborado por: Autores.

La actividad antrópica que tiene proximidad a cuerpos de agua dulce genera directa o indirectamente contaminación sobre estos. Los efectos de las emisiones químicas expresadas en kg equivalentes de 1,4-diclorobenceno (1,4DCB-eq) se utilizaron

como factor de caracterización en el nivel medio de toxicidad humana, ecotoxicidad en agua dulce, ecotoxicidad marina y ecotoxicidad terrestre.

- **Eutrofización del agua dulce**

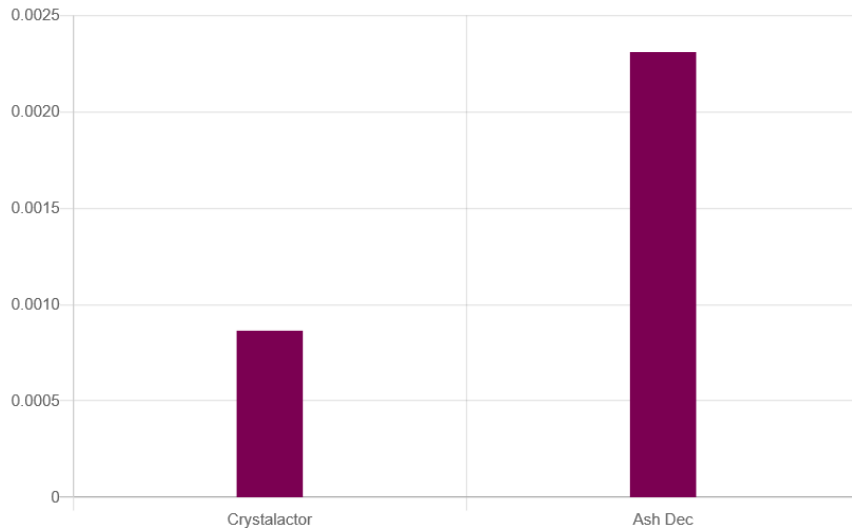


Figura 3.10. Comparación de categoría de análisis Eutrofización del agua potable en unidades kg P eq. Elaborado por: Autores.

El destino del fósforo forma la base de los factores de caracterización del punto medio de la eutrofización del agua dulce. Los potenciales de eutrofización de agua dulce (FEP) se expresan en kg P en equivalentes de agua dulce.

- **Calentamiento global**

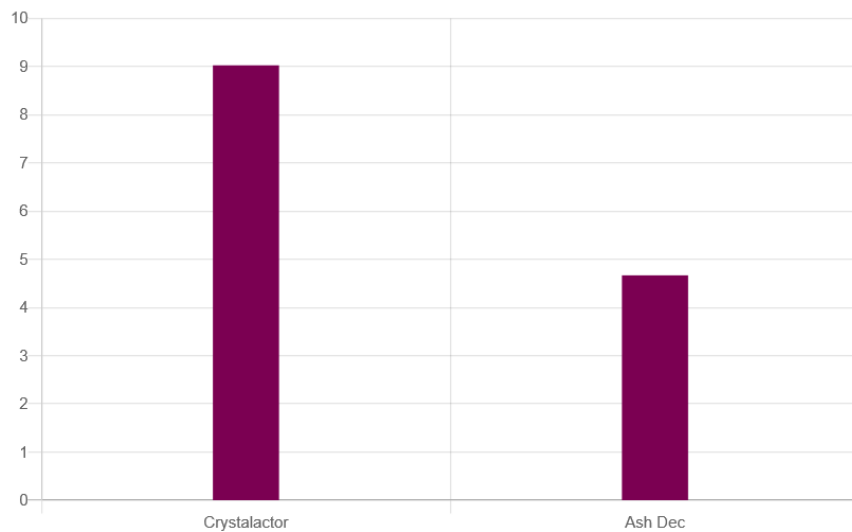


Figura 3.11. Comparación de categoría de análisis Calentamiento global en unidades kg CO2 eq. Elaborado por: Autores.

El factor de caracterización del punto medio seleccionado para el cambio climático es el potencial de calentamiento global (GWP) ampliamente utilizado, que cuantifica el aumento del forzamiento radiactivo infrarrojo integrado de un gas de efecto invernadero (GHG), expresado en kg CO<sub>2</sub>-eq.

- **Toxicidad cancerígena humana**

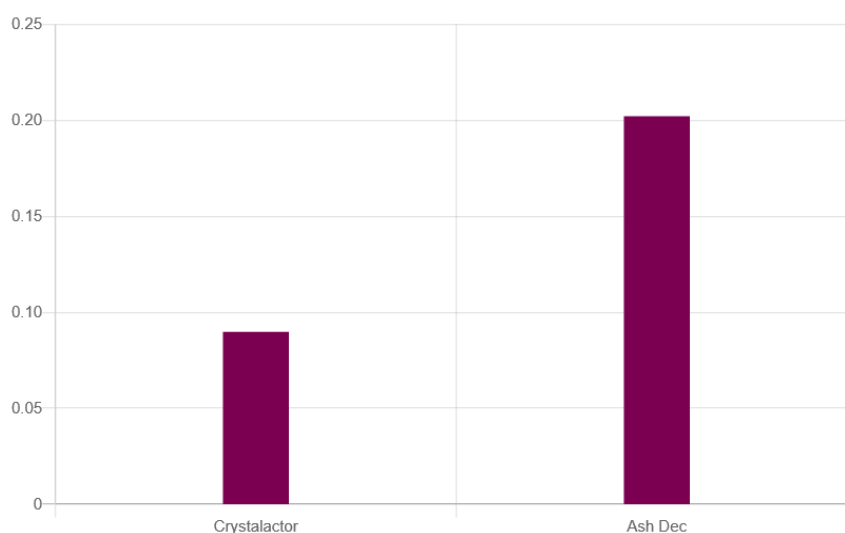


Figura 3.12. Comparación de categoría de análisis Toxicidad cancerígena humana en unidades kg 1,4-DCB. Elaborado por: Autores.

Los efectos de las emisiones químicas expresadas en kg equivalentes de 1,4-diclorobenceno (1,4DCB-eq) se utilizaron como factor de caracterización en el nivel medio de toxicidad humana, ecotoxicidad en agua dulce, ecotoxicidad marina y ecotoxicidad terrestre.

- **Consumo de agua**

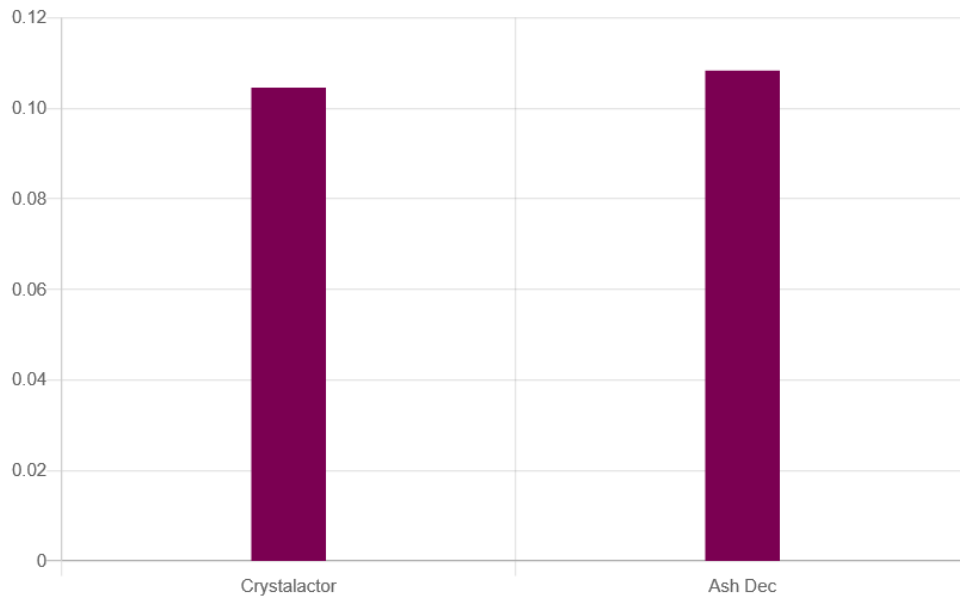


Figura 3.13. Comparación de categoría de análisis Consumo de agua en unidades m<sup>3</sup>. Elaborado por: Autores.

El factor de caracterización a nivel medio es metro cúbico de agua consumida por metro cúbico de agua extraída.

- **Global**

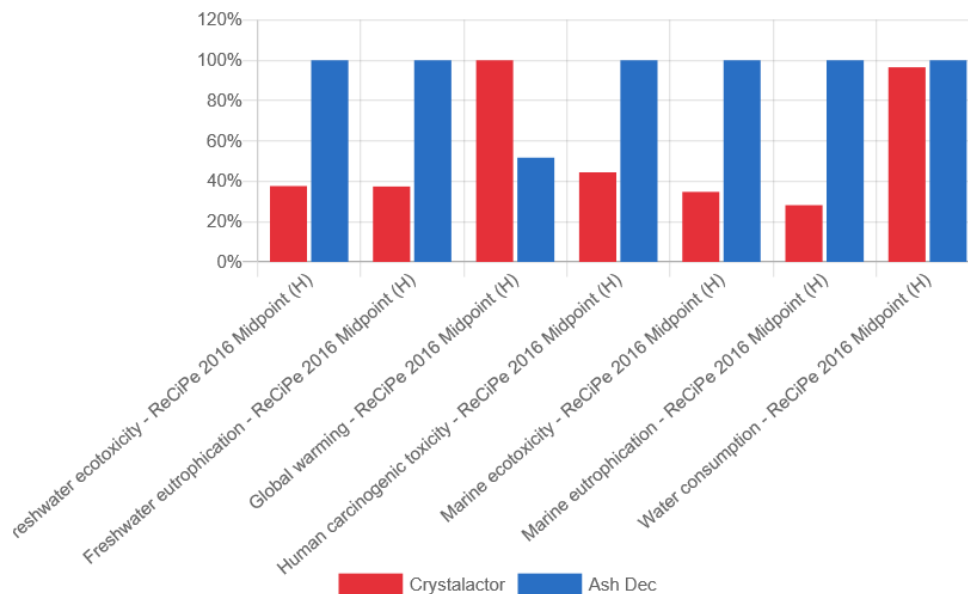


Figura 3.14. Resumen de comparación de categorías de análisis. Elaborado por: Autores.

La Figura 3.14 muestra los resultados de los indicadores relativos de las respectivas variantes del proyecto. Para cada indicador, el resultado máximo se establece en

100% y los resultados de las otras variantes se muestran en relación con este resultado.

A partir de los resultados en cada uno de los criterios de impacto, se procedió a realizar una normalización, con el fin de establecer una relación numérica teniendo diferentes unidades. En la tabla Tabla 3.5 se muestra lo obtenido:

Tabla 3.5. Normalización de valores de la evaluación del impacto del ciclo de vida. Elaborado por: Autores.

<b>Indicador</b>	<b>Crystalactor</b>	<b>AshDec</b>
Ecotoxicidad en agua dulce	0.38	1.0
Eutrofización de agua dulce	0.37	1.0
Calentamiento global	1.00	0.52
Toxicidad cancerígena humana	0.44	1.0
Ecotoxicidad marina	0.35	1.0
Eutrofización marina	0.28	1.0
Consumo de agua	0.97	1.0
<i>Total</i>	<b>3.79</b>	6.52

### **3.4 Modelos de negocio**

Como se mencionó en el apartado 1.4.4.1, lo que se busca es analizar las tres capas del modelo de negocio paralelamente, para lograr transmitir la propuesta de valor, el valor funcional y el valor social que puede ofrecer el campo de recuperación de minerales a partir de fuentes secundarias. A continuación, se muestran los lienzos de cada ámbito, aplicados al tema en análisis.





Figura 3.15. Canvas del modelo de negocio económico. Elaborado por: Autores.



Figura 3.16. Canvas del modelo de negocio ambiental. Elaborado por: Autores.



Figura 3.17. Canvas del modelo de negocio social. Elaborado por: Autores.

A partir de los modelos mostrados, se puede respaldar el análisis del modelo comercial y la innovación hacia modelos comerciales más sostenibles, integrando el potencial de creación de valor orientado a la sustentabilidad. Como se puede inferir, ya desde el modelo básico económico se integra la idea ambiental, con la presentación de la proposición de valor “Materia prima obtenida de fuentes secundarias y no de roca natural”. Esto abre inmediatamente el tópico de campañas de concientización ambiental y no solo marketing convencional para generar ventas, lo que conlleva al público a objetivar el impacto directo de este producto innovador. Una vez que ya se introduce el “beneficio” ambiental, se tiene la obligación de ser transparente en cuanto a los impactos como tales, que es donde intervienen los resultados presentados en el apartado anterior; siendo la variable más crítica, el potencial de calentamiento global, es decir, las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### 3.5 Discusión

#### 3.5.1 Análisis de ciclo de vida

Con respecto al análisis de ciclo de vida realizado en ambos tipos de procesos para la recuperación de fósforo, se puede inferir que:

- La ecotoxicidad es provocada por la liberación de sustancias tóxicas que se transfieren de la antroposfera a la hidrósfera. Al igual que en la categoría de

toxicidad humana, los principales impactos son causados por la propagación de lodos de depuradora sin tratar en áreas agrícolas. Por esta razón, se encuentra concordancia en que el valor obtenido para el proceso AshDec,  $2.23e-1$  kg 1,4-DCB sea más alto que el de Crystalactor que es de  $8.37e-2$  kg 1,4-DCB.

- El impacto de la eutrofización de agua dulce es causado únicamente por el retorno de fosfatos o nitratos al ciclo de nutrientes. Entre ambos procesos comparados, AshDec tiene el mayor valor, respaldado porque durante la propagación de lodos del 0 al 60% de los nutrientes mencionados, puede eventualmente transferirse al agua subterránea o superficial como nitrato. Sin embargo, el potencial de eutrofización real depende del tipo de suelo en específico, tópico que está fuera de estudio. Sin embargo, se debería tener presente que la escorrentía de nutrientes se vuelve más crítica si las áreas agrícolas están sujetas a sobrefertilización y las plantas no pueden absorber el exceso de nitrógeno.
- La toxicidad cancerígena humana es causada por metales pesados que se liberan a los suelos mientras se esparcen lodos de depuradora, y también puede venir de la producción de bienes de equipo y accesorios. Es importante resaltar que la toxicidad efectiva que resulta de la propagación de lodos no puede describirse con precisión por medio de un LCA, porque este solo calcula los impactos con respecto a la totalidad de las emisiones liberadas según las concentraciones resultantes. El mayor valor entre ambos, que se da en AshDec, podría darse por el alto contenido tóxico en los procesos de producción de insumos o recursos anteriores a el proceso de recuperación.
- Para la categoría de calentamiento global, el potencial de calentamiento global (GWP) del sistema de Crystalactor es mucho mayor al de AshDec. Esto es contribuido por ser un proceso en que se recupera el fósforo de la fase líquida. Al DHV Crystalactor se le atribuyen mayores emisiones de CO<sub>2</sub> debido a la correlación directa al aumento de los volúmenes de lodos a la planta de mono-incineración y, por lo tanto, mayores emisiones por incineración. Además, el uso de recursos como el ácido acético necesario como agente de alimentación de las bacterias para forzar la liberación del fósforo.
- El consumo de agua representa las extracciones de agua dulce que se evaporan, incorporan en productos y desechos, se transfieren a diferentes cuencas hidrográficas o se desechan en el mar después de su uso, por eso su unidad de análisis es metro cúbico de agua consumida por metro cúbico de agua extraída.

Si bien es cierto, la diferencia entre ambos procesos es mínima, pero de todas maneras los recursos utilizados en AshDec consumen mayor cantidad de agua que Crystalactor. Comparando a partir de la unidad funcional podría parecer un consumo no muy diferente, sin embargo, a una escala industrial podría tener un impacto significativo.

De manera global, según lo mostrado en la Tabla 3.5, se puede decir que la recuperación de fósforo en la fase líquida tiene impactos en su mayoría positivos o comparativamente pequeños. Sin embargo, bajo el criterio más fuerte y en la variable más importante para este caso, que serían las emisiones de CO<sub>2</sub>, Crystalactor tiene un valor significativamente más alto. Paralelamente, se debe considerar que, para la recuperación que viene de lodos, se usan tecnologías que ya se están aplicando o están cerca de ser aplicadas a gran escala, y están asociadas con emisiones y demanda comparativamente altas. La recuperación de las cenizas de los lodos de depuradora muestra resultados variables, que revelan en parte compensaciones entre la descontaminación de metales pesados, las emisiones y la demanda. Sin embargo, la recuperación de las cenizas se correlaciona con el mayor potencial para un reciclaje eficiente de fósforo. Es importante recordar que, como se mencionó en el apartado 2.4, el estudio que se está realizando tiene como volumen de control el proceso de recuperación como tal, lo que significa que la energía, las emisiones de CO<sub>2</sub>, el consumo de agua, y los niveles de toxicidad y eutrofización corresponden a esas actividades específicas, más no las de una PTAR con su proceso estándar. Al estar analizando estas etapas de recuperación de manera independiente, se entiende que es posible la comparación de los procesos sin las afectaciones que habría a causa de diferentes plantas de tratamiento existentes. De todas maneras, es necesario ahondar más en las implicaciones de las infraestructuras locales y los marcos legales para determinar los conceptos de recuperación y reciclaje del fósforo optimizados económica y ambientalmente.

### **3.5.2 Condiciones de Producción**

Como se observó en los resultados anteriores, y además en otros estudios, las tecnologías que recuperan P a partir de la fase líquida, en general, reducen la demanda de energía indirecta necesaria para producir los recursos y también el potencial de calentamiento global, sin embargo, el potencial de recuperación es

relativamente bajo. La recuperación de fósforo de la fase líquida es un proceso simple, como se puede ver en la Figura 1.11, mientras que la recuperación de fósforo de las cenizas de los lodos de depuración tiene un mayor consumo de energía y un mayor costo de inversión. Por el lado del proceso Crystalactor, un flujo rico en fosfato contiene 60–80 mg/L PO<sub>4</sub>, que llevado a fósforo es 20–26 mg/L, aproximadamente.

La concentración de PO<sub>4</sub> es importante, ya que entre mayor se la concentración de fosfato mejor será la eficiencia del proceso, y por lo tanto se reduce los costos de operación. En este proceso, cuando el pH se ajusta a 3.5 con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, los carbonatos inhiben la precipitación de fosfato de calcio; en ese caso se eliminan en un separador. La cristalización eficaz de fosfato de calcio requiere un pH de 9, por lo tanto, se añade una solución de Ca(OH)<sub>2</sub>. La tasa de recuperación puede alcanzar el 70-80% de PO<sub>4</sub>-P (Cornel & Schaum, 2009). Con el margen de recuperación mencionado anteriormente, la planta Crystalactor de fosfato de calcio en Geestmerambacht ha producido entre 200 y 300 toneladas por año (Gaastra et al., 1998).

Por otra parte, la tecnología AshDec demanda de mayores cantidades de energía por ser un proceso termoquímico que involucra incineradores y hornos que llegan a una temperatura de hasta 1050°C. Esta tecnología podría llegar a consumir hasta el triple de energía con respecto a Crystalactor (comparar en Tabla 2.2 y Tabla 2.4). Además, a diferencia del proceso de cristalización el pH no juega un papel importante en la recuperación de P a partir de las cenizas de lodo. En ese aspecto, la calidad del producto recuperado depende de los agentes utilizados, que ayuden en la eliminación de metales pesados y en la capacidad de absorción de P en las plantas.

En lo que se refiere a metales pesados y patógenos, las cenizas de los lodos si posee un alto contenido de estos componentes. Como se ha mencionado, la mayoría del contenido de metales pesados es volatilizado en una temperatura de 900°C-1000°C durante 60 minutos de exposición (se indica en Figura 1.16), mientras que los patógenos son eliminados cuando se sobrepasa la temperatura de 500°C en el horno giratorio (Naamane et al., 2016).

En el caso de la cristalización, el producto del proceso (estruvita) tiene un bajo riesgo de contaminación por patógenos, ya que de por sí este producto es una barrera patógena por su pH alto. Para que la estruvita sea repelente a los

patógenos, se requiere el uso de digestión anaeróbica termofílica antes de la recuperación de la estruvita para permitir un control efectivo de los patógenos (Batstone et al., 2015). Los metales pesados son removidos de la fase líquida mientras se forma la estruvita, cuando reacciona con un precipitante (Yu et al., 2013). Al final, los niveles de metales pesados son bajos o nulos en la estruvita (YingHao Liu et al., 2013).

Un factor importante, pero que aún no se determina con exactitud, es la cantidad de fósforo óptima. Cieslik (2017) afirma que el contenido de P óptimo en las cenizas no tratadas es 70 - 134g/kg DM (Dry Matter: Materia Seca), otros autores reportan de 120 a 160g/ kg DM (Jama-Rodzeńska et al., 2021; Kirchmann et al., 2017). Probablemente esto dependerá del tipo de agente químico, temperatura, tiempo en el horno utilizado.

### **3.5.3 Costos de operación**

Debido a que no se han realizados extensos estudios referente al análisis económico cuantitativo, los resultados del presente trabajo toma como referencia mayormente el estudio de Egle (2016) y como apoyo a otros autores.

El costo anual (de producción, sin considerar ingresos) de la recuperación de P a partir de la fase líquida de los lodos (Crystalactor) es de 6 a 10 €/kg  $P_{\text{recuperado}}$ , esto dependiendo de los ahorros por reducción costos de mantenimiento y de la cantidad de insumos usados por aumento de eficiencia. Entre la concentración de P en la fase líquida de los lodos sea mayor, se establece un menor costo de recuperación. En el análisis de costos de Egle (2016) se indica que el costo de operación de la planta podría aumentar un 25%, debido a los gastos mayormente relacionados a la inversión de equipos como el reactor donde ocurre la cristalización. Por otro lado, Li en (2019) indica que debido a la madurez de este tecnología, y tomando en cuenta los posibles ahorros por reducción de agentes químicos y los ingresos por la producción de fertilizante, este tipo de tecnología puede funcionar de manera rentable.

Por otra parte, la recuperación de P mediante el proceso termoquímico estudiado (AshDec) cuesta 2 €/kg  $P_{\text{recuperado}}$  anualmente, sin contar ingresos. En este caso se analizó el proceso AshDec usando sulfato de sodio, el cual mejora la solubilidad del del fósforo. Al producir un producto de mayor solubilidad (mayor calidad) el valor del producto puede llegar a costar más de 50€/ton de ceniza tratada.

Mientras que con el uso cloruros, el fósforo recuperado no es tan fácil de ser captado por las plantas, por ende, el precio de esta ceniza es mucho menor (1€/ton de ceniza tratada). Usando sulfato de sodio en AshDec, el aumento de costo de operación de la PTAR aumentaría tan solo un 5% en el mejor de los casos (Egle et al., 2016).

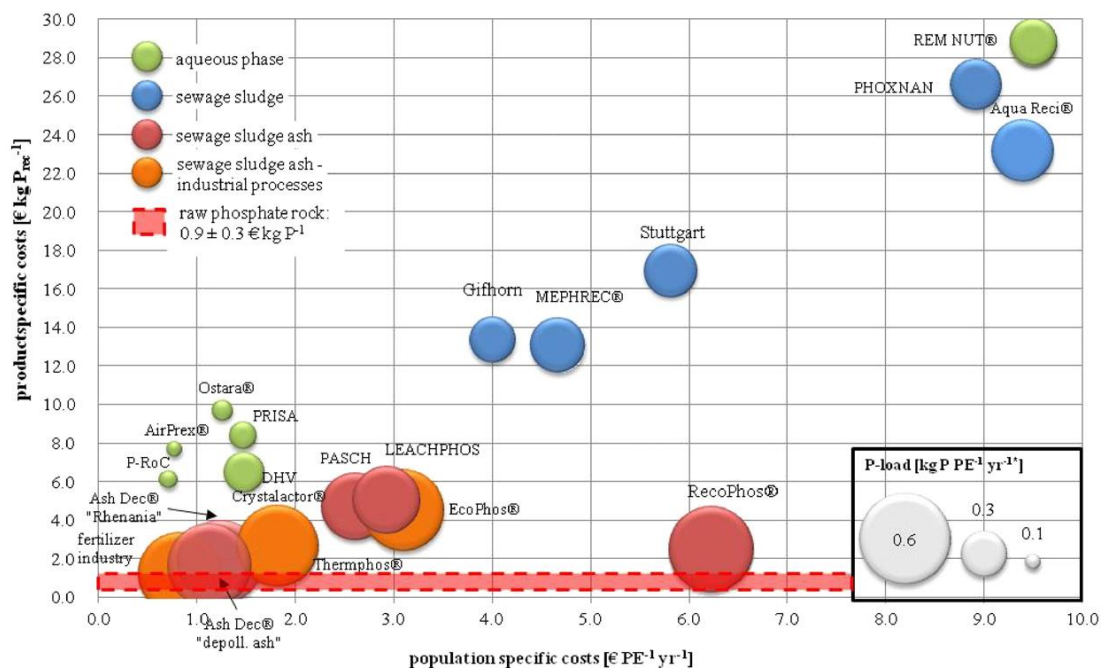
Los agentes químicos que usa el proceso AshDec, como el sulfato de sodio e hidróxido de carbono, son menos costosos con respecto a los químicos que se utiliza en la cristalización (ver Tabla 3.6), y además se usan en menores cantidades (Tabla 2.2 y Tabla 2.4). Según Ciešlik, este proceso termoquímico posee un alto costo de inversión con respecto a otras tecnologías, no obstante, es rentable cuando recibe grandes cantidades de lodo de la PDAR (2017).

Se debe tener en cuenta que mediante la implementación de estas tecnologías se reducirán los gastos por disposición final de lodos debido a la reducción de los mismo. El proceso termoquímico por tener un mayor grado de reducción de lodos comprenderá un mayor ahorro en los gastos de manejo o disposición final de lodos.

Tabla 3.6. Costos de recursos, tratamientos preliminares, disposición final de residuos, y de productos finales. Elaborado por: Autores. (Egle et al., 2016).

<b>Costos de demanda de recursos</b>				
<i>H2SO4 98%</i>	150	€/ton	169.5	\$/ton
<i>Ácido acético 99%</i>	550	€/ton	621.5	\$/ton
<i>Na100%</i>	330	€/ton	372.9	\$/ton
<i>Arena</i>	14.50	€/ton	16.44	\$/ton
<i>Na2SO4</i>	100	€/ton	113	\$/ton
<i>Ca(OH)2 100%</i>	140	€/ton	158.2	\$/ton
<i>Energía Eléctrica</i>	0.1	€/kWh	0.113	\$/kWh
<i>Gas Natural</i>	0.065	€/kWh	0.07345	\$/kWh
<b>Costo de tratamiento y disposición final</b>				
<i>Mono incineración de Lodos (30%MS)</i>	400	€/ton MS	452	\$/ton MS
<i>Depósito subterráneo de filter cake</i>	200	€/ton	226	\$/ton
<b>Ahorros por recuperación de nutrientes</b>				
<i>Fósforo P</i>	3.45	€/kg	3.8985	\$/kg
<i>Nitrógeno N</i>	0.75	€/kg	0.8475	\$/kg

Es importante definir sistemas de referencia para comparar de manera adecuada los costos de cada tecnología. Egle en su estudio realizó dos sistemas comparativos de evaluación económica. El primero está en función del costo por kilogramo de fósforo recuperado ( $\text{€/kg P}_{\text{recuperado}}$ ), en el cual se puede comparar el costo por el potencial de recuperación entre las tecnologías y contra el costo de producción convencional de fertilizantes minerales. El costo de fósforo extraído de la roca fosfato (30%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) es de  $0.9 \pm 0.3 \text{ €/kgP}$  y para el triple superfosfato comercial (46%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) a  $1.7 \pm 0.5 \text{ €/kgP}$  (World Bank, 2016), sin embargo, para el 2020 los costos se han reducido 69% y 91%, respectivamente, con respecto al costo por producto, mas no por Kg de P (World Bank, 2020). El segundo sistema usa como unidad funcional  $\text{€/PE}\cdot\text{año}$ , donde PE (Población Equivalente) es un valor referencial para contaminación en el agua residual afluente de la PDAR ( $1\text{PE}=120\text{g/DQO}$ ). En la Figura 3.18 se muestra la comparación de todas las tecnologías analizadas en (Egle et al., 2016), donde se puede identificar que a nivel de costos anuales Crystalactor y AshDec son las predominantes. Además, se podría estimar que AshDec tiene mayor potencial de recuperación fósforo por menor costo.



\* Bubble size indicates the recoverable P load in kg P per population equivalent per year. The maximum annual recoverable load of P is  $0.66 \text{ kg PE}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  or 65,700 kg (reference WWTP).

Figura 3.18. Gráfica comparativa del costo por producir 1kg de  $\text{P}_{\text{rec}}$  sin ingresos ni ahorros, y el costo con respecto a una PDAR con una carga contaminante de 100000 PE. (Egle et al., 2016).



En la Figura 3.18 el color verde corresponde los procesos que usan la fase líquida del lodo, la azul los lodos, rojo las cenizas de lodos, naranja a los que usan ceniza de lodos de procesos industriales

### **3.5.4 Potencial en Ecuador**

La aplicación de las tecnologías estudiadas debería ser analizada en las ciudades más pobladas del país (Guayaquil y Quito) para que tengan un mayor rendimiento y rentabilidad. Por ejemplo, la PDAR convencional de Queensland, en Australia, remueve DBO con lodos activados y tiene un afluente de 4 – 14 mg/l de PO<sub>4</sub> (Munch & Barr, 2001), donde según el análisis económico de (Li et al., 2019) bajo esas condiciones se podría implementar un proceso de cristalización de manera rentable. Tomando como base ese caso y las concentraciones promedio de fósforo en Guayaquil (13 mg/l de fósforo, o bien, 49 mg/l de PO<sub>4</sub>) ofrecidas por EMAPAG (2021); se puede inferir que en Guayaquil existe potencial de tener una mejor rentabilidad mediante cristalización por tener mayor concentración de fósforo con respecto al ejemplo. Sabiendo que AshDec tiene un costo de operación menor a Crystalactor, y que las capacidades como fertilizante son mejores en la ceniza que en la estruvita, se podría pensar que este proceso termoquímico también podría ser factible.

Ahora, tomando en cuenta el precio del DAP en el mercado, se encuentra entre \$40-\$45 el saco de 50kg (Condor, 2016), el fósforo recuperado por cristalización (estruvita) debería ser comercializado a las empresas comercializadoras de fertilizantes en un costo parecido dependiendo de las capacidades del producto final. En cambio, el kilogramo de fertilizante podría venderse a un mayor costo debido a que este contiene nutrientes secundarios como potasio, azufre, magnesio, zinc y silicato de potasio y sodio (Adam et al., 2009; Kabbe, 2013; Werner, 1967). Ninguno de estos componentes se encuentra en los fertilizantes comunes, al menos que sean agregados por un costo adicional.

Siendo el caso de que las tecnologías fueran implementadas en Quito y Guayaquil, bajo el criterio de que son las ciudades más pobladas y con el mayor número de PDAR, se podría definir una aportación de lodos de parte de la provincia de Imbabura, Cotopaxi y Tungurahua para Quito; y de Manabí, Azuay, El Oro y Loja para Guayaquil. Esta consideración, debido a que geográficamente

están cerca y existe potencial de producción de lodos en esas provincias, como se puede ver en la Figura 3.19 a continuación:

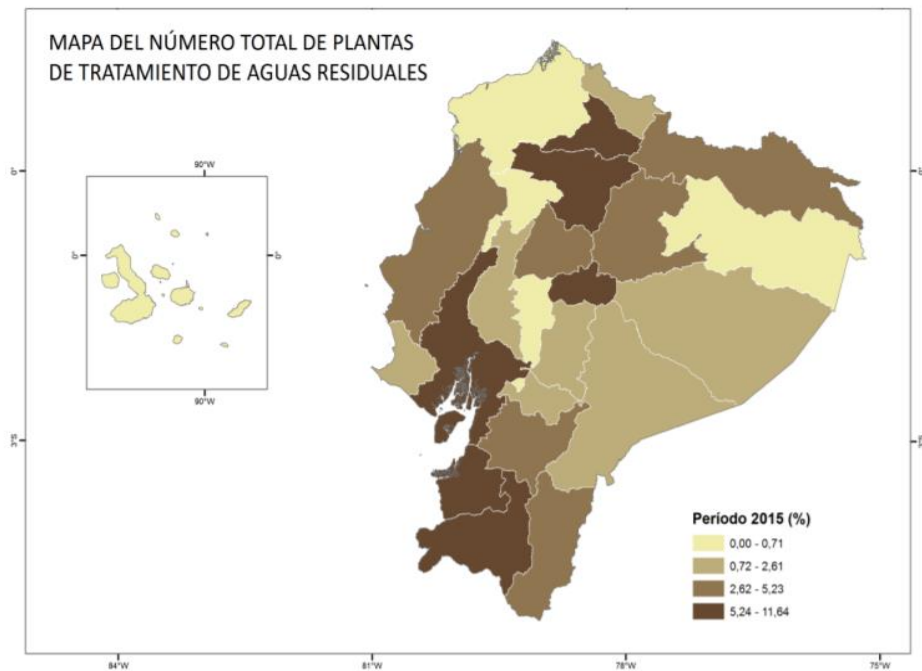


Figura 3.19. Mapa de porcentaje del número de PDAR a nivel regional (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2016).

Bajo esta misma premisa, las provincias más beneficiadas serían aquellas que le den valor a los sub-residuos de las PDAR (mencionadas anteriormente) y aquellas que tienen una mayor superficie y producción agrícola como Manabí, Guayas, Los Ríos y Esmeraldas (Arrien, 2018). El beneficio en el sector agrícola se fundamenta en el fortalecimiento de este sector, como consecuencia de mayor resiliencia al aumento de costo de fertilizantes importados, los cuales corresponden al 99% (Condor, 2016). Además, que se esperaría un consumo de fertilizantes más eficiente debido a la mejora de capacidad de aprovechamiento de fósforo en los productos recuperados a partir de las aguas residuales.

Para que este tipo de proyectos tenga una mayor facilidad de alcanzar la rentabilidad o impulsarla, podría ser necesario de la participación de actores que promuevan y efectúen políticas de incentivos o subsidios para proyectos sostenibles. La implementación de las tecnologías de recuperación debería ser respaldada por los actores gubernamentales considerando que este tipo de tecnología aporta a la resiliencia económica del país. Por otra parte, para incentivar la demanda de estos productos también sería necesario la participación

de entidades gubernamentales, que mediante bonos u otras herramientas, el sector agrícola tenga beneficios o descuentos por consumir fertilizantes sostenibles. En este último caso es necesaria la sinergia entre las empresas involucradas en saneamiento, entidades gubernamentales y proveedores del sector agrícola, para que se pueda lograr políticas que mejoren el modelo de negocio de los fertilizantes producidos mediante la recuperación del fósforo.

Otra iniciativa importante sería ser incorporar un modelo spin-off, en el que los desarrolladores del proyecto (entidad encargada de la PDAR) involucren a la academia, para que, mediante la investigación enfocada, mejoren las capacidades de los procesos de recuperación de fósforo. En este tipo de modelo la entidad interesada mediante transferencia de conocimiento logra mejorar la eficiencia de los procesos para tener una mayor rentabilidad. La academia como parte del modelo, también recibe beneficios de tipo económico, como auspicios o financiamiento para futuras investigaciones relacionadas al tema.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

Tras realizar el análisis del tema planteado se puede inferir que, en la actualidad, el fósforo se obtiene por la actividad minera que explota la roca fosfato, y de seguir la tendencia, el recurso podría agotarse, o en su defecto, los países mineros predominantes podrían crear una escasez relativa del elemento. A raíz de esto, se han buscado fuentes secundarias para la obtención del fósforo, y se ha encontrado que el mayor potencial de recuperación de fósforo puede hallarse en aguas residuales municipales, supliendo una parte de la demanda de fósforo como materia, y creando un sector agrícola resiliente frente a una potencial escasez o aumento de precio del fósforo. En este estudio se realizó una extensa revisión bibliográfica donde se pudieron destacar dos diferentes procesos de recuperación de fósforo que se pueden adaptar a la línea de tratamiento de aguas residuales. Estas son Crystalactor, que realiza la recuperación a partir de la fase líquida de los lodos de depuración mediante la cristalización de la estruvita, y AshDec, que crea un producto rico en fósforo a partir de las cenizas de los lodos a través de un proceso termoquímico.

Las principales diferencias, entre las tecnologías antes mencionadas, se basan en el consumo de energía y costo de producción, además del tipo de proceso de recuperación. Desde una perspectiva general, AshDec es el proceso que podría ser más conveniente ya que sería el proceso de recuperación con menor costo de producción, a pesar de que demande más energía y que presente relativamente un mayor impacto a la salud humana y los ecosistemas. Esto se debe principalmente a que en la cristalización se utilizan más materiales químicos para precipitar la estruvita, siendo esta última la razón por la que este proceso genera mayor emisión de CO<sub>2</sub> al ambiente, generando un mayor impacto directo. Además, este proceso de no deja de ser una solución a ciertos problemas medioambientales (escasez de recursos y generación de lodos) que compensan el impacto que produce.

Por otro lado, las capacidades del producto final obtenido del proceso AshDec son muchísimo mayor que las de la estruvita, lo que causa que el costo del producto

fuera mayor. Con esto, se abre la idea de manejar no solo el modelo económico convencional, sino también el modelo ambiental y social, es decir, crear una integración con el potencial de creación de valor orientado a la sustentabilidad. Presentando la proposición de valor “Materia prima obtenida de fuentes secundarias y no de roca natural”, se amplían las ideas de campañas de concientización ambiental y no solo marketing convencional para generar ventas, lo que conlleva al público a objetivar el impacto directo de este producto innovador.

#### **4.2 Recomendaciones**

Es indispensable tener en cuenta que, las tecnologías de recuperación de fósforo han sido desarrolladas para realizar la recuperación en aguas residuales municipales domésticas, por esta razón el sistema de alcantarillado debe estar apto en el sentido de que no debe haber infiltraciones de otros tipos de aguas residuales. En el medio ecuatoriano podría darse la existencia de filtraciones de aguas residuales por parte de las industrias, de manera que existiría la posibilidad de perjudicar la eficiencia del proceso. En ese sentido, debería haber una garantía de que el afluente en la PTAR donde se implemente el proceso de recuperación sea el adecuado. De esta manera se integraría de manera eficiente estos procesos en el objetivo por cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y lograr una ciudad circular.

Paralelamente, se debe considerar que, involucrar actores en la implementación de tecnologías de recuperación de fósforo es una estrategia que mejora la factibilidad de un proyecto de esta envergadura. Por eso es indispensable crear sinergias entre la academia, entidades gubernamentales y desarrolladores, con el propósito de escalar estas tecnologías al contexto ecuatoriano y adaptarlo para sea factible y mejorado. Adicionalmente, mediante estudios de factibilidad por parte de la academia y gestión gubernamental se puede crear un financiamiento especial a través de fondos bancarios dedicados a proyectos sostenibles. Estos fondos son otorgados por los bancos que practican las finanzas sostenibles, los cuales tienen como misión internalizar los principios del desarrollo sostenible en los sectores industriales y financieros.

En caso de tener concentraciones bajas de fosforo en la fase líquida de los lodos (2-20 mg/L), se puede recomendar el uso de tecnologías de acumulación de nutrientes. Las cuales acopian nutrientes solubles en el agua residual con bajas

concentraciones de estos, mediante métodos biológicos, químicos y físicos (Mehta et al., 2015), para mejorar la eficiencia del proceso de recuperación Crystalactor, como ejemplo. Sin embargo, la elección de una tecnología que se adapte, en términos de eficiencia y compatibilidad, requiere un análisis complejo.

# BIBLIOGRAFÍA

- Adam, C. (2004). *Thermochemische Behandlung von unterschiedlichen Klärschlammaschen mit dem Ziel der Abtrennung von Schwermetallen-Herstellung von Phosphat-Düngemitteln aus den behandelten Aschen: Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umelt, Naturschutz und Reak.*
- Adam, C., Peplinski, B., Michaelis, M., Kley, G., & Simon, F.-G. (2009). Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery. *Waste Management*, 29(3), 1122–1128.
- Agripac. (n.d.). *Agripac DAP 18-46-0.*
- Alcalde, L., & Gawlik, B. (2014). *Water Reuse in Europe - Relevant guidelines, needs for and barriers to innovation.* Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/29234>
- Arrien, I. (2018). *Fertilizantes en Ecuador.* ICEX España Exportación e InversioneS. <https://www.icex.es/icex/GetDocumento?dDocName=DOC2018789042&urlNoAcceso=/icex/es/registro/iniciar-sesion/index.html?urlDestino=https://www.icex.es:443/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/sectores/industria-y-tecn>
- Balmér, P., & Hultman, B. (1988). Control of phosphorus discharges: present situation and trends. *Hydrobiologia*, 170(1), 305–319. <https://doi.org/10.1007/BF00024911>
- Batstone, D. J., Hülsen, T., Mehta, C. M., & Keller, J. (2015). Platforms for energy and nutrient recovery from domestic wastewater: A review. *Chemosphere*, 140, 2–11.
- Biswas, B. K., Inoue, K., Harada, H., Ohto, K., & Kawakita, H. (2009). Leaching of phosphorus from incinerated sewage sludge ash by means of acid extraction followed by adsorption on orange waste gel. *Journal of Environmental Sciences*, 21(12), 1753–1760. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62484-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62484-5)
- Blankesteyn, M. (2019). From measuring to removing to recovering phosphorus in water management in the Netherlands: Challenges for science-based innovation. *Science of The Total Environment*, 666, 801–811. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.230>
- Brindle, K., & Stephenson, T. (1996). The application of membrane biological reactors for the treatment of wastewaters. *Biotechnology and Bioengineering*, 49(6), 601–610.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19960320\)49:6<601::AID-BIT1>3.0.CO;2-S](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19960320)49:6<601::AID-BIT1>3.0.CO;2-S)

- Bueno-Jáquez, J. E., Alonso-López, A., Volke-Haller, V., Gallardo-López, F., Ojeda-Ramírez, M. M., & Mosqueda-Vázquez, R. (2014). *Response of Papaya Tree to Nitrogen , Phosphorus , and Potassium Fertilization in a Luvisol. May.* <https://doi.org/2395-8030>
- Caminade, A.-M., & Majoral, J.-P. (2005). Phosphorus dendrimers possessing metallic groups in their internal structure (core or branches): Syntheses and properties. *Coordination Chemistry Reviews*, 249(17), 1917–1926. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ccr.2005.01.021>
- Chrispim, M. C., Scholz, M., & Nolasco, M. A. (2019). Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries. *Journal of Environmental Management*, 248, 109268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109268>
- Cieślik, B., & Konieczka, P. (2017). A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of “no solid waste generation” and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1728–1740. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.116>
- Cisse, L., & Mrabet, T. (2004). World phosphate production: overview and prospects. *Phosphorus Research Bulletin*, 15, 21–25.
- Condor, F. M. L. (2016). Vulnerabilidad y dependencia internacional de fertilizantes en el Ecuador. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 29(2).
- Cordell, D. (2010). *The Story of Phosphorus: Sustainability implications of global phosphorus scarcity for food security.*
- Cordell, D., Drangert, J.-O., & White, S. (2009a). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Cordell, D., Drangert, J.-O., & White, S. (2009b). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Cordell, D., & White, S. (2011). Peak phosphorus: clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. *Sustainability*, 3(10), 2027–2049.
- Cornel, P., & Schaum, C. (2009). Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs. *Water Science and Technology*, 59(6), 1069–1076.



<https://doi.org/10.2166/wst.2009.045>

- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145–155.
- De Boer, J., Prikken, M., Lei, W. U., Begemann, M., & Sommer, I. (2018). The effect of raloxifene augmentation in men and women with a schizophrenia spectrum disorder: A systematic review and meta-analysis. *Npj Schizophrenia*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s41537-017-0043-3>
- De Gregorio, C. (2015). *Optimización del proceso de remoción de fósforo en lodos activados por métodos químicos*. Universidad Nacional de La Plata.
- de Gregorio, C., Caravelli, A. H., & Zaritzky, N. E. (2010). *Remoción de fósforo mediante cloruro férrico en sistemas batch. Efecto de la presencia de biomasa de lodos activados*.
- Desmidt, E., Ghyselbrecht, K., Zhang, Y., Pinoy, L., Van der Bruggen, B., Verstraete, W., Rabaey, K., & Meesschaert, B. (2015). Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(4), 336–384.
- Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J., & Zessner, M. (2016). Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 571, 522–542.
- Ehara, T., Nakagomi, S., & Kokubun, Y. (2003). Preparation of phosphorous dope beta-irondisilicide thin films and application for devices. *Solid-State Electronics*, 47(2), 353–356. [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(02\)00219-8](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(02)00219-8)
- EMAPAG. (2021). *Composición de afluente y efluentes en plantas de tratamiento en Guayaquil*.
- ESPP. (2020). New sewage sludge ordinance passed the German cabinet. *European Sustainable Phosphorus Platform*. <https://phosphorusplatform.eu/scope-in-print/news/1395-new-sewage-sludge-ordinance-passed>
- European Fertilizer Manufacturers Association. (2000). Phosphorus: essential element for food production. *European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA), Brussels*, 9–10.
- Fahimi, A., Federici, S., Depero, L. E., Valentim, B., Vassura, I., Ceruti, F., Cutaia, L., & Bontempi, E. (2021). Evaluation of the sustainability of technologies to recover phosphorus from sewage sludge ash based on embodied energy and CO2 footprint.

- Journal of Cleaner Production*, 289, 125762.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125762>
- Federation, W. E., & APH Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association (APHA).  
<https://doi.org/https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.216>
- Florian, L.-F. (2015a). *THE TRIPLE LAYERED BUSINESS MODEL CANVAS – A TOOL TO DESIGN MORE SUSTAINABLE BUSINESS MODELS*.  
<https://sustainablebusinessmodel.org/2015/04/17/the-triple-layered-business-model-canvas-a-tool-to-design-more-sustainable-business-models/>
- Florian, L.-F. (2015b). *THE TRIPLE LAYERED BUSINESS MODEL CANVAS – A TOOL TO DESIGN MORE SUSTAINABLE BUSINESS MODELS*.
- Freeman, R. E., & McVea, J. (2001). *A Stakeholder Approach to Strategic Management*. 32. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.263511>
- Gaastra, S., Schemen, R., Bakker, P., & Bannink, M. (1998). *Full scale phosphate recovery at sewage treatment plant Geestmerambacht, Holland* (p. (pp. 6-7)). Warwick University.
- Geissler, B., Hermann, L., Mew, M. C., & Steiner, G. (2018). Striving Toward a Circular Economy for Phosphorus: The Role of Phosphate Rock Mining. In *Minerals* (Vol. 8, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/min8090395>
- Gellermann, C. (2021). *Innovative circular approaches on the recycling of phosphorus*. Fraunhofer-Projektgruppe IWKS.
- Gerba, C. P., & Pepper, I. L. (2019). Municipal wastewater treatment. In *Environmental and Pollution Science* (pp. 393–418). Elsevier.
- Gericke, S. (1968). *Thomasphosphat Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung (Thomasphosphate, handbook of plant nutrition and fertilisation), vol. 2*. Springer-Verlag, Wien/New York.
- Giensen, A., & Van der Moldeh, J. G. (1996). *The crystalactor: wastewater treatment by crystallization without waste production*. DHV Water BV, Amerfoort.
- Giesen, A. (1999). Crystallisation Process Enables Environmental Friendly Phosphate Removal at Low Costs. *Environmental Technology*, 20(7), 769–775.  
<https://doi.org/10.1080/09593332008616873>
- Gomes de Quevedo, C. M., & da Silva Paganini, W. (2015). Detergents as a Source of Phosphorus in Sewage: the Current Situation in Brazil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2700-3>

- Gray, N. F., Chen, G. H., van Loosdrecht, M., Ekama, G., & Brdjanovic, D. (2020). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design - 2nd edition*.
- Green, B. W. (2015). 2 - Fertilizers in aquaculture. In D. A. B. T.-F. and F. P. in A. Davis (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition* (pp. 27–52). Woodhead Publishing. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100506-4.00002-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100506-4.00002-7)
- Guinee, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(5), 311. <https://doi.org/10.1007/BF02978897>
- Günther, S., Grunert, M., & Müller, S. (2018). Overview of recent advances in phosphorus recovery for fertilizer production. *Engineering in Life Sciences*, 18(7), 434–439. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/elsc.201700171](https://doi.org/10.1002/elsc.201700171)
- Guzmán, R. (2014). *PLAN DE NEGOCIOS PARA COMERCIALIZAR PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES DE UNA EMPRESA INDIA EN CHILE*. UNIVERSIDAD DE CHILE. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/131826/Plan-de-negocios-para-comercializar-productos-agroindustriales.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Hannington, M., Petersen, S., & Krätschell, A. (2017). Subsea mining moves closer to shore. *Nature Geoscience*, 10(3), 158–159. <https://doi.org/10.1038/ngeo2897>
- Hano, T., Takanashi, H., Hirata, M., Urano, K., & Eto, S. (1997). Removal of phosphorus from wastewater by activated alumina adsorbent. *Water Science and Technology*, 35(7), 39–46. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00112-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00112-1)
- Hart, S. L., & Sharma, S. (2004). Engaging fringe stakeholders for competitive imagination. *Academy of Management Perspectives*, 18(1), 7–18. <https://doi.org/10.5465/ame.2004.12691227>
- He, Y., Zhao, G., & Gong, X. (2017). *Preference, Social Utility and Relative Scarcity*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1960711>
- Heffer, P., Prud homme, M. P. R., Muirheid, B., & Isherwood, K. F. (2006). Phosphorus fertilisation: Issues and outlook. *Proceedings-International Fertiliser Society*, 586.
- Hermann, L., Kraus, F., & Hermann, R. (2018). Phosphorus Processing—Potentials for Higher Efficiency. In *Sustainability* (Vol. 10, Issue 5). <https://doi.org/10.3390/su10051482>
- Hermann, L., & Schaaf, T. (2019). Outotec (AshDec®) process for P fertilizers from sludge ash. In *Phosphorus Recovery and Recycling* (pp. 221–233). Springer.

- Hukari, S., Hermann, L., & Nätörp, A. (2016). From wastewater to fertilisers — Technical overview and critical review of European legislation governing phosphorus recycling. *Science of The Total Environment*, *542*, 1127–1135. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.064>
- Jama-Rodzeńska, A., Sowiński, J., Koziel, J. A., & Białowiec, A. (2021). Phosphorus Recovery from Sewage Sludge Ash Based on Cradle-to-Cradle Approach—Mini-Review. In *Minerals* (Vol. 11, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/min11090985>
- Ji, B., Zhu, L., Wang, S., Qin, H., Ma, Y., & Liu, Y. (2020). A novel micro-ferrous dosing strategy for enhancing biological phosphorus removal from municipal wastewater. *Science of The Total Environment*, *704*, 135453. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135453>
- Jones, A. G. (2002). *Crystallization process systems*. Elsevier.
- Joss, A., Zabczynski, S., Göbel, A., Hoffmann, B., Löffler, D., McArdell, C. S., Ternes, T. A., Thomsen, A., & Siegrist, H. (2006). Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: Proposing a classification scheme. *Water Research*, *40*(8), 1686–1696. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.02.014>
- Joyce, A., & L.Paquin, R. (2016a). The triple layered business model canvas: A tool to design more sustainable business models. *Journal of Cleaner Production*, *135*, 1474–1486. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.067>
- Joyce, A., & L.Paquin, R. (2016b). The triple layered business model canvas: A tool to design more sustainable business models. *Journal of Cleaner Production*, *135*, 1474–1486. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.067>
- Jupp, A. R., Beijer, S., Narain, G. C., Schipper, W., & Slootweg, J. C. (2021). Phosphorus recovery and recycling—closing the loop. *Chemical Society Reviews*.
- Kabbe, C. (2013). Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery. *Bluefacts*, *4*, 36–41.
- Kimura, K., Naruse, T., & Watanabe, Y. (2009). Changes in characteristics of soluble microbial products in membrane bioreactors associated with different solid retention times: Relation to membrane fouling. *Water Research*, *43*(4), 1033–1039. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.024>
- Kirchmann, H., Börjesson, G., Kätterer, T., & Cohen, Y. (2017). From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook. *Ambio*, *46*(2), 143–154. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0816-3>

- Koohsaryan, E., Anbia, M., & Maghsoodlu, M. (2020). Application of zeolites as non-phosphate detergent builders: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104287>
- Kwapinski, W., Kolinovic, I., & Leahy, J. J. (2021). Sewage Sludge Thermal Treatment Technologies with a Focus on Phosphorus Recovery: A Review. *Waste and Biomass Valorization*, 12(11), 5837–5852. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01280-2>
- Le-Clech, P., Chen, V., & Fane, T. A. G. (2006). Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 284(1), 17–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.08.019>
- Le Corre, K. S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., & Parsons, S. A. (2009). Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(6), 433–477.
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.042>
- Libro Blanco de Economía Circular de Ecuador* (p. 212). (2021). Ministerio de Producción Comercio Exterior Inversiones y Pesca. [https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/05/Libro-Blanco-final-web\\_mayo102021.pdf](https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/05/Libro-Blanco-final-web_mayo102021.pdf)
- Lipińska, D. (2018a). The water-wastewater-sludge sector and the circular economy. *Comparative Economic Research*, 21(4), 121–137. <https://doi.org/10.2478/cer-2018-0030>
- Lipińska, D. (2018b). The water-wastewater-sludge sector and the circular economy. *Comparative Economic Research*, 21(4), 121–137. <https://doi.org/10.2478/cer-2018-0030>
- Liu, D. H. F., & Lipták, B. G. (2020). *Wastewater treatment*. CRC Press.
- Liu, Yi, Chen, J., Mol, A. P. J., & Ayres, R. U. (2007). Comparative analysis of phosphorus use within national and local economies in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(2), 454–474.
- Liu, YingHao, Kumar, S., Kwag, J., & Ra, C. (2013). Magnesium ammonium phosphate formation, recovery and its application as valuable resources: a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(2), 181–189.
- Liu, YingHao, Kwag, J.-H., Kim, J.-H., & Ra, C. (2011). Recovery of nitrogen and phosphorus by struvite crystallization from swine wastewater. *Desalination*, 277(1),

- 364–369. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.056>
- Lundin, M., Olofsson, M., Pettersson, G. J., & Zetterlund, H. (2004). Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. *Resources, Conservation and Recycling*, 41(4), 255–278. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2003.10.006>
- Maki, A. W., Porcella, D. B., & Wendt, R. H. (1984). The impact of detergent phosphorus bans on receiving water quality. *Water Research*, 18(7), 893–903. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1354\(84\)90275-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1354(84)90275-6)
- Marani, D., Braguglia, C. M., Mininni, G., & Maccioni, F. (2003). Behaviour of Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, and Zn in sewage sludge incineration by fluidised bed furnace. *Waste Management*, 23(2), 117–124.
- Mateo, J. J. (2019). *¿Cuáles son las certificaciones relacionadas a la sostenibilidad y qué significa cada una?* <https://ivoro.pro/cuales-son-las-certificaciones-relacionadas-a-la-sostenibilidad-y-que-significa-cada-una/>
- Mayer, B. K., Baker, L. A., Boyer, T. H., Drechsel, P., Gifford, M., Hanjra, M. A., Parameswaran, P., Stoltzfus, J., Westerhoff, P., & Rittmann, B. E. (2016). Total Value of Phosphorus Recovery. *Environmental Science & Technology*, 50(13), 6606–6620. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01239>
- Mehta, C. M., Khunjar, W. O., Nguyen, V., Tait, S., & Batstone, D. J. (2015). Technologies to recover nutrients from waste streams: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(4), 385–427.
- Mishra, F. K. P., & Mahanty, N. B. (2012). *Characterization of sewage and design of sewage treatment plant*.
- Mitchell, R. K., Agle, B. R., & Wood, D. J. (1997). Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience: Defining the Principle of who and What Really Counts. *Academy of Management Review*, 22(4), 853–886. <https://doi.org/10.5465/amr.1997.9711022105>
- Mullin, J. W. (2001). *Crystallization*. Elsevier.
- Munch, E. V., & Barr, K. (2001). Controlled struvite crystallisation for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams. *Water Research*, 35(1), 151–159. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00236-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00236-0)
- Naamane, S., Rais, Z., & Taleb, M. (2016). The effectiveness of the incineration of sewage sludge on the evolution of physicochemical and mechanical properties of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 112, 783–789.

- Neethling, J. B., & Benisch, M. (2004). Struvite control through process and facility design as well as operation strategy. *Water Science and Technology*, 49(2), 191–199.
- Nezat, C. A., Blum, J. D., Yanai, R. D., & Park, B. B. (2008). Mineral Sources of Calcium and Phosphorus in Soils of the Northeastern United States. *Soil Science Society of America Journal*, 72(6), 1786–1794. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0344>
- Orhon, D., Sözen, S., Basaran, S., & Alli Bingol, B. (2015). Super fast membrane bioreactor—transition to extremely low sludge ages for waste recycle and reuse with energy conservation. *Desalination and Water Treatment*, 57, 1–13. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1127781>
- Qian, T.-T., & Jiang, H. (2014). Migration of Phosphorus in Sewage Sludge during Different Thermal Treatment Processes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(6), 1411–1419. <https://doi.org/10.1021/sc400476j>
- Quimasa. (n.d.). *Quimasa Fosfato Diamonico DAP*.
- Ramalho, R. S. (2021). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté.
- Raschid-Sally, L., & Jayakody, P. (2009). *Drivers and characteristics of wastewater agriculture in developing countries: Results from a global assessment (Vol. 127)*. IWMI.
- Rentz, J. A., Turner, I. P., & Ullman, J. L. (2009). Removal of phosphorus from solution using biogenic iron oxides. *Water Research*, 43(7), 2029–2035. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.02.021>
- Ribarova, I., Dimitrova, S., Lambeva, R., Wintgens, T., Stemann, J., & Remmen, K. (2017). Phosphorus recovery potential in Sofia WWTP in view of the national sludge management strategy. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 152–159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.003>
- RMIS. (2020). *Raw Materials Information Systems*. <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2020-e294f6>
- Roser, M., Ritchie, H., & Ortiz-Ospina, E. (2013). *World Population Growth*. OurWorldInData.Org.
- Royo, M. Á. (2017). *NUTRICIÓN EN SALUD PÚBLICA*. Escuela Nacional de Sanidad. Instituto de Salud Carlos III. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. <https://doi.org/62170352>
- Samreen, S., & Kausar, S. (2019). *Phosphorus Fertilizer: The Original and Commercial Sources*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82240>

- Sathasivan, A. (2009). Biological phosphorus removal processes for wastewater treatment. In *Oxford (UK): Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)* (Water and, pp. 1–23).
- Schipper, W., Klapwijk, A., Potjer, B., Rulkens, W., Temmink, B., Kiestra, F. D., & Lijmbach, A. C. (2001). Phosphate Recycling in the Phosphorus Industry. *Environmental Technology*, 22, 1337–1345. <https://doi.org/10.1080/09593330.2001.9619173>
- Seyhan, D. (2009). Country-scale phosphorus balancing as a base for resources conservation. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(12), 698–709.
- Smol, M. (2019a). 28 - *Phosphorus extraction and sludge dissolution* (M. N. V. Prasad, P. J. de Campos Favas, M. Vithanage, & S. V. B. T.-I. and M. S. Mohan (Eds.); pp. 657–677). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815907-1.00028-3>
- Smol, M. (2019b). 28 - *Phosphorus extraction and sludge dissolution* (M. N. V. Prasad, P. J. de Campos Favas, M. Vithanage, & S. V. B. T.-I. and M. S. Mohan (Eds.); pp. 657–677). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815907-1.00028-3>
- Smol, M. (2019c). The importance of sustainable phosphorus management in the circular economy (CE) model: the Polish case study. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(2), 227–238. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0794-6>
- Sonune, A., & Ghate, R. (2004). Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*, 167, 55–63.
- Sun, C., Leiknes, T., Weitzenböck, J., & Thorstensen, B. (2010). Salinity effect on a biofilm-MBR process for shipboard wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 72(3), 380–387. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.03.010>
- Tang, Z., Kong, N., Ouyang, J., Feng, C., Kim, N. Y., Ji, X., Wang, C., Farokhzad, O. C., Zhang, H., & Tao, W. (2020). Phosphorus Science-Oriented Design and Synthesis of Multifunctional Nanomaterials for Biomedical Applications. *Matter*, 2(2), 297–322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.12.007>
- UK Soil Association. (2010). *A rock and a hard place: Peak phosphorus and the threat to our food security*.
- Unión Europea, M. (2021). *Comunicación de la Comisión relativa a la aplicación de la Directiva sobre la evaluación del impacto ambiental (Directiva 2011/92/UE del*



- Parlamento Europeo y el Consejo, en su versión modificada por la Directiva 2014/52/UE) a las modificaciones y extensio. Agencia Estatal Boletín Oficial Del Estado.* <https://doi.org/DOUE-Z-2021-70075>
- United State Enviromental Protection Agency (EPA). (2004). *Primer for Municipal Wastewater Treatment (Report Number EPA 832-R-04-001)*.
- Urdalen, I. (2013). Phosphorus recovery from municipal wastewater. *Norwegian University of Science and Technology: Trondheim, Norway*.
- Van Drecht, G., Bouwman, A. F., Harrison, J., & Knoop, J. M. (2009). Global nitrogen and phosphate in urban wastewater for the period 1970 to 2050. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2009GB003458>
- Van Kauwenbergh, S. J. (2010). *World phosphate rock reserves and resources*. IFDC Muscle Shoals.
- Van Vuuren, D. P., Bouwman, A. F., & Beusen, A. H. W. (2010). Phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion. *Global Environmental Change*, 20(3), 428–439.
- Vega, J. A. (2006). *Estudio de factibilidad del pr Estudio de factibilidad del proyecto explotación de r o explotación de roca fosfórica oca fosfóri*. UNIVERSIDAD DE LA SALLE.  
[https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1030&context=esp\\_gerencia\\_proyectos](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1030&context=esp_gerencia_proyectos)
- Veolia WaterTechnologies. (2015). *Sustainable phosphorus recovery*. <https://www.enviropro.co.uk/entry/139402/Veolia-Water-Technologies-UK/Struvia-sustainable-phosphorus-recovery/#gallery-block>
- Vogel, C., Exner, R. M., & Adam, C. (2013). Heavy metal removal from sewage sludge ash by thermochemical treatment with polyvinylchloride. *Environmental Science & Technology*, 47(1), 563–567.
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B., & Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic Sargassum belt. *Science*, 365(6448), 83–87.
- Weerasekara, N. A., Choo, K.-H., & Lee, C.-H. (2014). Hybridization of physical cleaning and quorum quenching to minimize membrane biofouling and energy consumption in a membrane bioreactor. *Water Research*, 67, 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.049>
- Weigand, H., Bertau, M., Bohndick, F., & Bruckert, A. (2011). Recophos: full-scale recovery of phosphate from sewage sludge ash. *Sardinia 2011 Proceeding of the*

*Thirteenth International Waste Management, Landfill Symposium.*

- Werner, W. (1967). *Die Rhenania-Dunger; Monographie uber Herstellung, Eigenschaften und Wirkung der Rhenania-Dunger.*
- Withers, P. J. A., Elser, J. J., Hilton, J., Ohtake, H., Schipper, W. J., & Van Dijk, K. C. (2015). Greening the global phosphorus cycle: how green chemistry can help achieve planetary P sustainability. *Green Chemistry*, 17(4), 2087–2099.
- Woods, N. C., Sock, S. M., & Daigger, G. T. (1999). Phosphorus recovery technology modeling and feasibility evaluation for municipal wastewater treatment plants. *Environmental Technology*, 20(7), 663–679.
- World Bank. (2016). *World Bank GEM commodities databank for phosphate rock and TSP.* <http://data.worldbank.org/data-catalog/commodityprice-%0Adata>.
- World Bank. (2020). *World Bank GEMcommodities databank for phosphate rock and TSP.* <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/5d903e848db1d1b83e0ec8f744e55570-0350012021/related/CMO-Pink-Sheet-December-2021.pdf>
- Yeoman, S., Stephenson, T., Lester, J. N., & Perry, R. (1988). The removal of phosphorus during wastewater treatment: A review. *Environmental Pollution*, 49(3), 183–233. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269-7491\(88\)90209-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269-7491(88)90209-6)
- Yu, R., Ren, H., Wang, Y., Ding, L., Geng, J., Xu, K., & Zhang, Y. (2013). A kinetic study of struvite precipitation recycling technology with NaOH/Mg(OH)<sub>2</sub> addition. *Bioresource Technology*, 143, 519–524. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.042>

# **ANEXOS**

## Anexo 1.- Información Emapag

Tabla A.1. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de enero de 2021. Elaborado por: Autores.

<b>PUNTO</b>	<b>PARAMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>SALIDA</b>
<b>PUERTO HONDO</b>	Cloruros	mg/L	85,6	75,5
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	93	14
	DQO	mg/L	156	24
	Fósforo Total	mg/L	3,2	2,2
	Sólidos Suspendidos	mg/L	116	30
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	15531	378,4
<b>VALLE ALTO</b>	Cloruros	mg/L	53	120,8
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	103	29
	DQO	mg/L	185	45
	Fósforo Total	mg/L	1	5,8
	Sólidos Suspendidos	mg/L	78	34
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	1361	483,5
<b>CIUDAD OLIMPO</b>	Cloruros	mg/L	60,4	75,5
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	103	17
	DQO	mg/L	180	32
	Fósforo Total	mg/L	2,4	4,6
	Sólidos Suspendidos	mg/L	77	30
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	2909	24,3
<b>COSTALMAR</b>	Cloruros	mg/L	83,1	46,6
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	258	16
	DQO	mg/L	379	28
	Fósforo Total	mg/L	4,6	3,4
	Sólidos Suspendidos	mg/L	105	30
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	14136	195,6

Tabla A.2. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de febrero de 2021. Elaborado por: Autores.

<b>PUNTO</b>	<b>PARAMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>SALIDA</b>
<b>LOMA VISTA</b>	Cloruros	mg/L	46,9	55,2
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	178	52
	DQO	mg/L	297	89
	Fósforo Total	mg/L	6	12,4
	Sólidos Suspendidos	mg/L	197	36
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	7890000	1
<b>PORTON BEATA</b>	Cloruros	mg/L	50,7	44,7
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	248	118
	DQO	mg/L	370	203
	Fósforo Total	mg/L	9	11,2
	Sólidos Suspendidos	mg/L	306	98
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	32550000	325500
<b>CARACOL</b>	Cloruros	mg/L	27	18,5
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	98	50
	DQO	mg/L	140	75
	Fósforo Total	mg/L	3,6	10,2
	Sólidos Suspendidos	mg/L	106	34
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	5120000	344800
<b>TOTORI</b>	Cloruros	mg/L	134,5	35,2
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	348	108
	DQO	mg/L	503	170
	Fósforo Total	mg/L	20,2	1,1
	Sólidos Suspendidos	mg/L	218	99
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	241960000	21400

Tabla A.3. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de marzo de 2021. Elaborado por: Autores.

<b>PUNTO</b>	<b>PARAMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>SALIDA</b>
<b>METROPOLIS 1</b>	Cloruros	mg/L	46,3	42,4
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	188	24
	DQO	mg/L	305	40
	Fósforo Total	mg/L	13,8	6
	Sólidos Suspendidos	mg/L	199	30
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	35400	0,1
<b>METROPOLIS 2</b>	Cloruros	mg/L	51,3	54,2
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	238	30
	DQO	mg/L	425	50
	Fósforo Total	mg/L	20	8,6
	Sólidos Sedimentables	mg/L	6	0,1
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	205,3	146,4
<b>METROPOLIS 3</b>	Cloruros	mg/L	55,2	297,6
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	248	63
	DQO	mg/L	411	104
	Fósforo Total	mg/L	15,6	7,4
	Sólidos Suspendidos	mg/L	250	73
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	800	0,1
<b>METROPOLIS 4</b>	Cloruros	mg/L	76,9	68
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	258	36
	DQO	mg/L	429	61
	Fósforo Total	mg/L	21,6	8
	Sólidos Suspendidos	mg/L	429	30
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	24500	1

Tabla A.4. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de abril de 2021. Elaborado por: Autores.

<b>PUNTO</b>	<b>PARAMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>SALIDA</b>
<b>PUERTAS SEYMOUR</b>	Cloruros	mg/L	63,1	62,1
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	288	38
	DQO	mg/L	470	53
	Fósforo Total	mg/L	13,8	7,2
	Sólidos Suspendidos	mg/L	142	30
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	104620	0,1
<b>LAGUNA CLUB 2</b>	Cloruros	mg/L	292,7	3345,8
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	158	98
	DQO	mg/L	199	188
	Fósforo Total	mg/L	10,2	7,4
	Sólidos Suspendidos	mg/L	55	47
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	1640	1200
<b>LAGUNA CLUB 1</b>	Cloruros	mg/L	293,7	5168,9
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	98	123
	DQO	mg/L	212	238
	Fósforo Total	mg/L	8,2	8,6
	Sólidos Suspendidos	mg/L	46	30
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	15000	16070
<b>CUMBRES DEL SOL</b>	Cloruros	mg/L	57,2	63,1
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	1648	108
	DQO	mg/L	3440	182
	Fósforo Total	mg/L	48,8	12,2
	Sólidos Suspendidos	mg/L	750	86
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	310	1

Tabla A.5. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de mayo de 2021. Elaborado por: Autores.

<b>PUNTO</b>	<b>PARAMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>SALIDA</b>
<b>COLINA DEL SOL 1</b>	Cloruros	mg/L	4,1	65,9
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	188	163
	DQO	mg/L	257	226
	Fósforo Total	mg/L	11	13,6
	Sólidos Suspendidos	mg/L	58	56
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	32550000	1119900
<b>GUAYAQUIL 2</b>	Cloruros	mg/L	76	74
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	538	248
	DQO	mg/L	752	352
	Fósforo Total	mg/L	20,6	14,4
	Sólidos Suspendidos	mg/L	292	136
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	27390000	750000
<b>5 DE DICIEMBRE</b>	Cloruros	mg/L	67,9	70
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	278	15
	DQO	mg/L	390	20
	Fósforo Total	mg/L	8,4	3,6
	Sólidos Suspendidos	mg/L	137	30
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	11199	0,1
<b>SOCIO VIVIENDA 1</b>	Cloruros	mg/L	57,8	140,9
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	458	238
	DQO	mg/L	633	327
	Fósforo Total	mg/L	16,6	19,8
	Sólidos Suspendidos	mg/L	104	150
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	1732900	275500



Tabla A.6. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de junio de 2021. Elaborado por: Autores.

<b>PUNTO</b>	<b>PARAMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>SALIDA</b>
<b>TERRANOSTRA 1</b>	Cloruros	mg/L	60,8	396,4
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	418	26
	DQO	mg/L	523	37
	Fósforo Total	mg/L	9	5
	Sólidos Suspendidos	mg/L	139	30
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	4610000	1
<b>TERRANOSTRA 2</b>	Cloruros	mg/L	722,9	718,8
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	458	56
	DQO	mg/L	617	78
	Fósforo Total	mg/L	9,8	5,2
	Sólidos Suspendidos	mg/L	235	31
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	410000	1
<b>LAGUNA MI LOTE</b>	Cloruros	mg/L	53,7	54,8
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	258	88
	DQO	mg/L	332	118
	Fósforo Total	mg/L	5,2	5
	Sólidos Suspendidos	mg/L	123	92
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	3060000	111200
<b>CIUDAD SANTIAGO</b>	Cloruros	mg/L	7,1	556,6
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	738	66
	DQO	mg/L	1029	94
	Fósforo Total	mg/L	5,6	4,4
	Sólidos Suspendidos	mg/L	445	37
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	2690000	1

Tabla A.7. Valores de caracterización en diferentes puntos de Guayaquil, mes de julio de 2021. Elaborado por: Autores.

<b>PUNTO</b>	<b>PARAMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>SALIDA</b>
<b>PORTOVITA</b>	Cloruros	mg/L	18,9	60,5
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	558	73
	DQO	mg/L	738	106
	Fósforo Total	mg/L	25	11,8
	Sólidos Suspendidos	mg/L	297	34
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	65370000	118700
<b>VIA AL SOL</b>	Cloruros	mg/L	69,5	85,4
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	288	138
	DQO	mg/L	384	186
	Fósforo Total	mg/L	10,2	10,4
	Sólidos Suspendidos	mg/L	131	42
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	27230000	5380000
<b>ARCADIA</b>	Cloruros	mg/L	72,5	91,3
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	848	15
	DQO	mg/L	1120	21
	Fósforo Total	mg/L	18,6	9,2
	Sólidos Suspendidos	mg/L	455	30
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	54750000	1950
<b>BELO HORIZONTE</b>	Cloruros	mg/L	37,7	51,6
	DBO <sub>5</sub>	mg/L	478	143
	DQO	mg/L	620	192
	Fósforo Total	mg/L	19,8	6,4
	Sólidos Suspendidos	mg/L	103	119
	Coliformes Fecales NMP	NMP/100mL	86640000	152900

# Results of project: Procesos de recuperacion de fosforo

## Introduction

In the following the results of the project are shown. This is a default template for the report of the project results. You can configure this template via the project editor by

- changing the text of the sections,
- adding or removing sections,
- moving sections around,
- and selecting visual components that should be shown.

Note that you can also use HTML elements to format the section texts. Additionally, you can export this report as an HTML page using the export button in the toolbar of the report view.

## Project Variants

This table shows the name and description of the variants as defined in the project setup. The variant names of the project setup are used for all charts and tables of the other report components.

Parameter	Ash Dec	Crystalactor
-----------	---------	--------------

## Selected LCIA Categories

The table below shows the LCIA categories of the selected LCIA method of the project. Only the LCIA categories that are selected to be displayed are shown in the report. Additionally, a user friendly name and a description for the report can be provided.

Indicator	Unit	Description
Fine particulate matter formation - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg PM2.5 eq	
Fossil resource scarcity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg oil eq	
Freshwater ecotoxicity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg 1,4-DCB	
Freshwater eutrophication - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg P eq	
Global warming - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg CO2 eq	
Human carcinogenic toxicity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg 1,4-DCB	
Human non-carcinogenic toxicity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg 1,4-DCB	
Ionizing radiation - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kBq Co-60 eq	
Land use - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	m2a crop eq	
Marine ecotoxicity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg 1,4-DCB	
Marine eutrophication - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg N eq	
Mineral resource scarcity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg Cu eq	
Ozone formation, Human health - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg NOx eq	
Ozone formation, Terrestrial ecosystems - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg NOx eq	

Indicator	Unit	Description
Stratospheric ozone depletion - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg CFC11 eq	
Terrestrial acidification - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg SO2 eq	
Terrestrial ecotoxicity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	kg 1,4-DCB	
Water consumption - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	m3	

## LCIA Results

This table shows the LCIA results of the project variants. Each selected LCIA category is displayed in the rows and the project variants in the columns. The unit is the unit of the LCIA category as defined in the LCIA method.

Indicator	Ash Dec	Crystalactor	Unit
Fine particulate matter formation - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1.49864e-2	9.10365e-3	kg PM2.5 eq
Fossil resource scarcity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	9.99386e-1	1.75792e+0	kg oil eq
Freshwater ecotoxicity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1.92974e-1	8.36784e-2	kg 1,4-DCB
Freshwater eutrophication - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1.68485e-3	8.64596e-4	kg P eq
Global warming - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	6.14193e-1	9.02619e+0	kg CO2 eq
	-4.44433e-1	8.97970e-2	

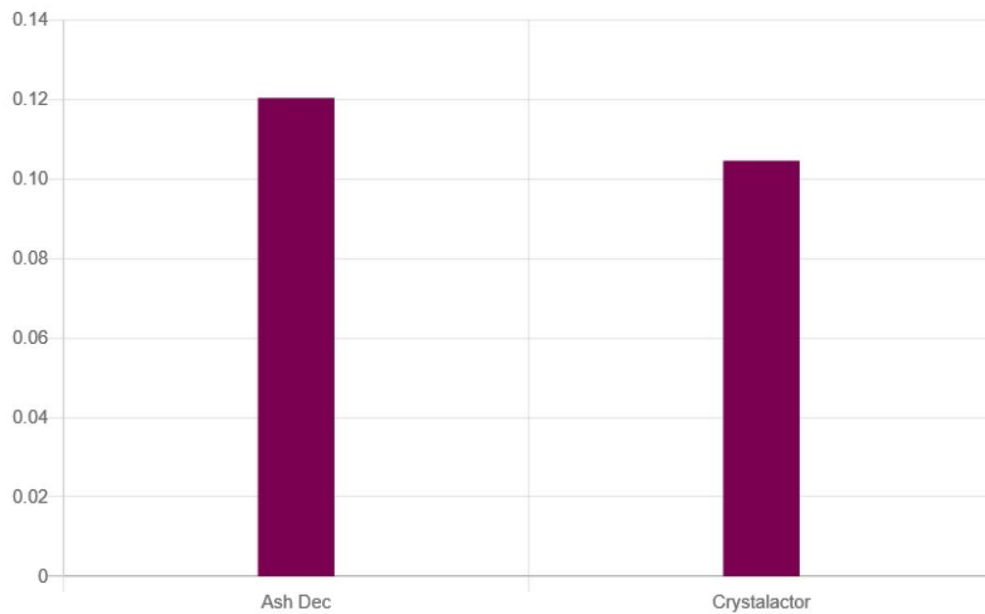
Indicator	Ash Dec	Crystalactor	Unit
Human carcinogenic toxicity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)			kg 1,4-DCB
Human non-carcinogenic toxicity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	8.61336e+0	1.78379e+0	kg 1,4-DCB
Ionizing radiation - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	5.73793e-1	1.06258e-1	kBq Co-60 eq
Land use - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	5.35482e-2	5.04387e-2	m2a crop eq
Marine ecotoxicity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	2.79852e-1	1.11577e-1	kg 1,4-DCB
Marine eutrophication - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	2.40067e-4	5.91844e-5	kg N eq
Mineral resource scarcity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1.09737e-2	5.89824e-3	kg Cu eq
Ozone formation, Human health - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	2.08947e-3	1.55615e-2	kg NOx eq
Ozone formation, Terrestrial ecosystems - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	2.15225e-3	1.60112e-2	kg NOx eq
Stratospheric ozone depletion - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	4.81167e-6	1.57741e-6	kg CFC11 eq
Terrestrial acidification - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	7.59504e-2	2.46739e-2	kg SO2 eq
	2.65052e+1	6.11821e+0	

Indicator	Ash Dec	Crystalactor	Unit
Terrestrial ecotoxicity - ReCiPe 2016 Midpoint (H)			kg 1,4-DCB
Water consumption - ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1.20356e-1	1.04557e-1	m3

## Single Indicator Results

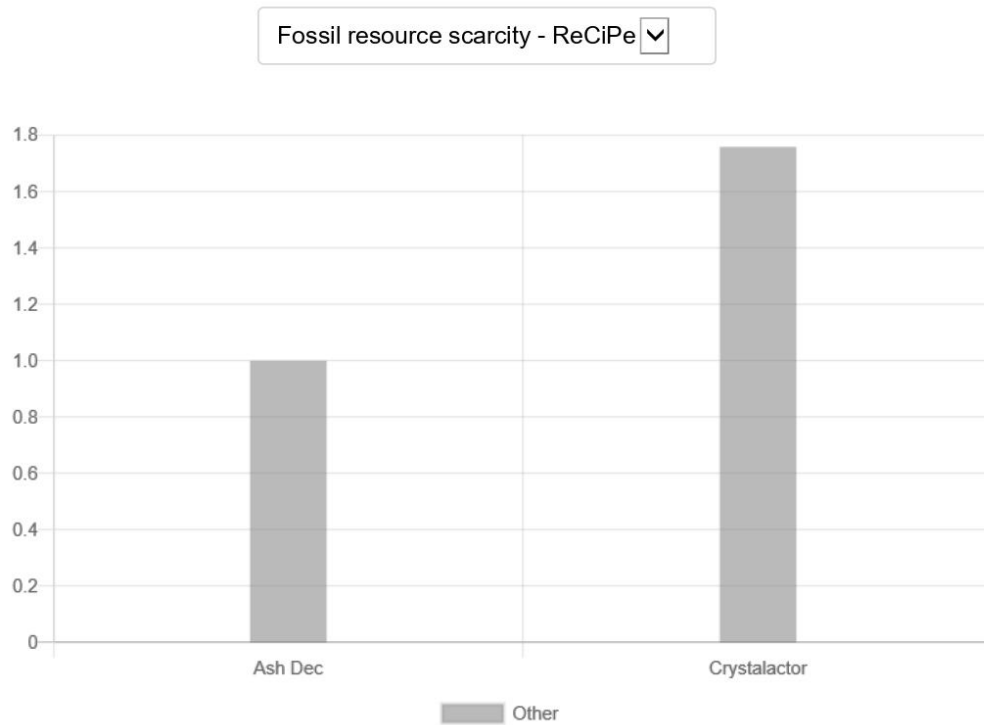
The following chart shows the single results of each project variant for the selected indicator. You can change the selection and the chart is dynamically updated.

Water consumption - ReCiPe 201



## Process Contributions

This chart shows the contributions of the selected processes in the project setup to the variant results of the selected LCIA category. As for the single indicator results, you can change the selection and the chart is dynamically updated.



## Relative Results

The following chart shows the relative indicator results of the respective project variants. For each indicator, the maximum result is set to 100% and the results of the other variants are displayed in relation to this result.



