

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

Sustentabilidad y tecnología

PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP)

Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental

Energética y Alimentaria



**ITESO, Universidad
Jesuita de Guadalajara**

4D09 – Innovación y Emprendimientos Biotecnológicos

Producción de Fertilizante Químico a partir del Tratamiento de Vinazas

Tequileras

PRESENTAN

Programas educativos y Estudiantes

Ing. En Química. Jesús Alejandro Núñez Alatorre.

Ing. En Química. Iliá Otal Chang.

Profesor PAP: Dr. Luis Edmundo Garrido Sánchez, Dr. Alejandro Arana Sánchez.

Tlaquepaque, Jalisco, abril de 2024

ÍNDICE

Contenido

REPORTE PAP	1
Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional	2
Resumen	0
1. Ciclo participativo del Proyecto de Aplicación Profesional.....	0
1.1 Entendimiento del ámbito y del contexto	0
1.2 Caracterización de la organización o comunidad	11
1.3 Identificación de la(s) problemática(s).....	12
1.4. Planeación de alternativa(s).....	14
Metodología pirólisis:.....	14
Metodología cristalización de estruvita:.....	15
Metodología electrocoagulación:	16
Metodología lagunas anaeróbicas:.....	17
Metodología ácido fosfórico:.....	18
Selección de metodología:.....	19
1.5. Desarrollo de la propuesta de mejora	21
1.6. Valoración de productos, resultados e impactos	32
Cuantificación del tratamiento de la vinaza:	40
Parámetros de producción:	42
Costos	43
1.7. Bibliografía y otros recursos	44
2. Productos	48
3. Reflexión crítica y ética de la experiencia.....	49
3.1 Sensibilización ante las realidades	50
3.2 Aprendizajes logrados	52

REPORTE PAP

Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional

Los Proyectos de Aplicación Profesional (PAP) son experiencias socio-profesionales de los alumnos que desde el currículo de su formación universitaria- enfrentan retos, resuelven problemas o innovan una necesidad sociotécnica del entorno, en vinculación (colaboración) (co-participación) con grupos, instituciones, organizaciones o comunidades, en escenarios reales donde comparten saberes.

El PAP, como espacio curricular de formación vinculada, ha logrado integrar el Servicio Social (acorde con las Orientaciones Fundamentales del ITESO), los requisitos de dar cuenta de los saberes y del saber aplicar los mismos al culminar la formación profesional (Opción Terminal), mediante la realización de proyectos profesionales de cara a las necesidades y retos del entorno (Aplicación Profesional).

El PAP es un proceso acotado en el tiempo en que los estudiantes, los beneficiarios externos y los profesores se asocian colaborativamente y en red, en un proyecto, e incursionan en un mundo social, como actores que enfrentan verdaderos problemas y desafíos traducibles en demandas pertinentes y socialmente relevantes. Frente a éstas transfieren experiencia de sus saberes profesionales y demuestran que saben hacer, innovar, co-crear o transformar en distintos campos sociales.

El PAP trata de sembrar en los estudiantes una disposición permanente de encargarse de la realidad con una actitud comprometida y ética frente a las disimetrías sociales. En otras palabras, se trata del reto de “saber y aprender a transformar”.

El Reporte PAP consta de tres componentes:

El primer componente refiere al ciclo participativo del PAP, en donde se documentan las diferentes fases del proyecto y las actividades que tuvieron lugar durante el desarrollo de este y la valoración de las incidencias en el entorno.

En caso de requerirse alguna adecuación al nombre de las fases propuestas para este componente, se puede realizar siempre y cuando sea complementario a lo ya establecido.

El segundo componente presenta los productos elaborados de acuerdo con su tipología.

El tercer componente es la reflexión crítica y ética de la experiencia, el reconocimiento de las competencias y los aprendizajes profesionales que el estudiante desarrolló en el transcurso de su labor.

Resumen

Las vinazas son el subproducto más relevante en el proceso de destilación del licor de *Agave tequilana Weber var Azul*. En los últimos años se ha presentado un incremento significativo en la producción de tequila en el país, lo que ha resultado en un notable aumento en la cantidad de vinaza generada como residuo. En el presente trabajo se evaluará la viabilidad de la producción de un fertilizante químico a partir de la vinaza tequilera. La metodología propuesta consiste en la cristalización controlada y posterior precipitación de estruvita. La estruvita es un mineral que se puede emplear directamente como fertilizante en campos de cultivo debido a sus propiedades y características. Mediante este procedimiento se logró obtener un fertilizante químico compuesto de nitrógeno (N), magnesio (Mg) y fósforo (P). Así mismo, se realizó la caracterización de este mineral por medio de espectrofotometría de rayos X y espectroscopia.

1. Ciclo participativo del Proyecto de Aplicación Profesional

El PAP es una experiencia de aprendizaje y de contribución social integrada por estudiantes, profesores, actores sociales y responsables de las organizaciones, que de manera colaborativa construyen sus conocimientos para dar respuestas a problemáticas de un contexto específico y en un tiempo delimitado. Por tanto, la experiencia PAP supone un proceso en lógica de proyecto, así como de un estilo de trabajo participativo y recíproco entre los involucrados.

1.1 Entendimiento del ámbito y del contexto

El estado de Jalisco es uno de los estados más emblemáticos de México, especialmente porque la cultura de Jalisco ha tenido una influencia significativa en la identidad mexicana. Una de las principales influencias es gracias a la bebida alcohólica de origen llamada “Tequila”, puesto que esta bebida mexicana se ha convertido en un símbolo de la identidad nacional, siendo una de las principales cosas que nos representa a nivel mundial (*De Agricultura y Desarrollo Rural*, s. f.).

El agave azul (*Agave tequilana Weber var. azul*) es una planta suculenta perenne perteneciente a la familia Agavácea nativa de las regiones xerófilas de México. Se cultiva

principalmente en la región conocida como Denominación de Origen del Tequila (DOT), que comprende a los estados de Jalisco, Michoacán, Tamaulipas, Nayarit y Guanajuato. Debido a la importancia económica que tiene el cultivo de agave (*Agave tequilana* Weber var. Azul) en la industria del tequila en México, se requiere de un manejo adecuado en el cumplimiento de las necesidades nutricionales de esta planta (Bautista, 2001).

En 2022, la producción de tequila alcanzó los 651 millones de litros, y la exportación creció un 16,3% respecto al año anterior (*De Agricultura y Desarrollo Rural*, s. f.). Entre los años 2000 y 2023, la producción de esta bebida en el país mexicano aumentó en un 120%. El tequila se ha convertido en un elemento importante para la economía de México, ya que su producción, distribución y venta impulsan a la economía de millones de mexicanos (*Del Tequila*, s. f.).



Imagen 1. Denominación de origen del tequila (*Del Tequila*, s.f.).

Los principales municipios de Jalisco productores de tequila son ocho y conforman la Ruta del Tequila: Arenal, Amatitán, El Salto, El Valle, Magdalena, Tequila, Tonalá y Zapopan ya que en estos se concentra la mayor producción de tequila (Rivera, 2023).

Sin embargo, esta industria ha sido por décadas la segunda fuente más grande de contaminación del suelo y el agua en Jalisco. Cuando se vierte 1 litro de tequila en un barril, de 7 a 11 litros de vinazas residuales caen al suelo o se vierten en mantos acuíferos (*Herrera, 2022*). Como bien se mencionó, este desecho contiene mucha materia orgánica, la cual inhibe la vida en los ríos y campos al privarla de oxígeno, promueve la acidificación del suelo, la disminución de la calidad del agua potable, afectando la salud humana y el ecosistema en general. A pesar de los esfuerzos regulatorios y las iniciativas de algunas destilerías para tratar las vinazas, la gestión adecuada de este residuo sigue siendo un desafío importante en la industria tequilera. Se necesitan soluciones innovadoras y sostenibles para el tratamiento y aprovechamiento de las vinazas, que permitan reducir su impacto ambiental y promover la producción responsable de tequila en la región de la Ruta del Tequila (*Del Tequila, s. f.*).

Las vinazas, los subproductos más importantes de la destilación del tequila, poseen una elevada concentración de materia orgánica, con una demanda química de oxígeno (DQO) que supera los 38,215 mg/L y sólidos totales (ST) mayores a 21,883 mg/L. Su pH oscila entre 3.5 y 4 y son desechadas a 90°C, lo que las convierten en una fuente de contaminación térmica. El tono oscuro de las vinazas se atribuye a melanoidinas, fenoles, caramelo y melanina, comunes en el licor de destilerías de melazas. Estas sustancias se forman por las reacciones amino-carbonilo de Maillard al calentar los azúcares de las pencas de agave (*Iñiguez, 2010*).

La alta cantidad de materia orgánica y su color característico reducen la penetración de luz en cuerpos de agua, afectando la actividad fotosintética de organismos acuáticos y disminuyendo el oxígeno disuelto, lo que afecta la vida acuática. A su vez, la disposición no tratada de vinazas en suelos puede favorecer la proliferación de organismos patógenos para ciertos cultivos. Por ello, algunos estudios sugieren someter las vinazas a tratamientos biológicos antes de su aplicación en suelos, ya que las formas químicas del carbono en ellas mejoran las propiedades de los suelos (*Iñiguez, 2010*).

Para mitigar el impacto ambiental, las autoridades exigen medidas de control y tratamiento de las aguas residuales de la industria tequilera. Las regulaciones establecen límites para la

descarga de DBO5, sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos sedimentables (SS). Sin embargo, muchas empresas aún no cumplen con estas normativas. Algunas compañías implementan tecnologías como la termoevaporación y la ósmosis inversa, aunque estas no son completamente sostenibles y requieren pretratamiento para la eliminación de sólidos (Iñiguez, 2010).

Como ya se mencionó previamente, las vinazas son un residuo el cual contiene un gran contenido de materia orgánica, su gestión y disposición muestran desafíos ambientales importantes, sin embargo, con el tratamiento adecuado las vinazas pueden convertirse en una fuente potencial de fertilizantes. Las vinazas contienen nutrientes como nitrógeno, potasio, fósforo, y muchos más que pueden ser beneficiosos para el suelo. Para poder tener un aprovechamiento eficiente de este residuo se necesitaría neutralizar y ajustar el pH para que sea adecuado para el uso agrícola. Así mismo, se tendría que hacer una reducción de contaminantes, esto se podría realizar con métodos biológicos como digestores anaerobios (Urzúa, 2012).

Los nutrientes presentes en las vinazas podrían tener la capacidad de devolver nutrientes al suelo y reducir la necesidad de fertilizantes sintéticos. Así mismo, se mejoraría la condición del suelo, ya que se le aportaría materia orgánica la cual puede regenerar la estructura del suelo y su capacidad para retener agua (Urzúa, 2012).

De manera general, la nutrición vegetal en cualquier sistema de producción agrícola debe tener como objetivo aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos, utilizando un enfoque económico, optimizando los recursos agrícolas y a su vez ser respetuoso con el medio ambiente (Mengel, 2000).

En la nutrición vegetal se requieren de nutrientes esenciales para el crecimiento adecuado de las plantas. Estos son carbono (C), oxígeno (O), hidrógeno (H), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo) y cloro (Cl) (Arnold, 1939).

Dentro de estos nutrientes se dividen en dos; los nutrientes minerales y los no minerales. En los nutrientes no minerales las plantas absorben el carbono y oxígeno del aire en forma de dióxido de carbono (CO₂) a través de sus hojas (*Sela, 2024*). A su vez, en la fotosíntesis, las plantas convierten el dióxido de carbono y el agua en hidrógeno, carbono y oxígeno, mientras que, todos los nutrientes minerales se absorben a través de las raíces (*Carril, 2011*).

Los nutrientes minerales se clasifican en tres grupos de manera general, macronutrientes primarios, macronutrientes secundarios y micronutrientes (*Navarro, 2023*). El grupo de los macronutrientes está compuesto por; N, P K, mientras que el grupo de los macronutrientes secundarios está compuesto por; Ca, Mg, S. Por otro lado, los micronutrientes están compuestos por; Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl, de los cuales los macronutrientes son necesarios en grandes cantidades, mientras que los nutrientes secundarios y los micronutrientes son necesarios en proporciones menores y muy pequeñas, respectivamente (*Mengel, 2000*).

El nitrógeno es uno de los macronutrientes primarios esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, a su vez el nitrógeno es considerado el más importante, por ser el que se encuentra en mayor proporción, 1 a 3 % con respecto a su materia seca (*Mengel, 2000*). Las funciones del N son de tipo estructural y osmótico, las primeras son específicas y se relacionan con la síntesis de moléculas esenciales para el crecimiento, como ácidos nucleicos, aminoácidos, proteínas, clorofilas y alcaloides (*Jones, 1998*).

Dado que el agua representa el principal factor restrictivo para el crecimiento de las plantas y es esencial para integrar el desarrollo y la actividad metabólica a nivel celular, se ha destacado la importancia del nitrógeno no solo como nutriente, sino también como un agente osmótico (*McIntyre, 1997*). La función osmótica está asociada al efecto del ión nitrato y a otras formas reducidas del N, en la reducción del potencial hídrico de la vacuola, dentro del proceso de osmoregulación (*Hopkins, 1995*).

Además, el nitrógeno actúa como componente activo de las enzimas, lo que impulsa el metabolismo de las plantas y promueve su crecimiento. El suministro adecuado de nitrógeno se refleja en hojas más grandes, mayor ramificación y períodos vegetativos prolongados. Sin

embargo, su deficiencia tiene consecuencias negativas. La escasez de nitrógeno ralentiza la síntesis proteica, llevando a la planta a descomponer sus propias proteínas para satisfacer sus necesidades, lo que resulta en tallos y hojas con un tinte morado debido al exceso de carbohidratos. Además, la carencia de nitrógeno conduce al deterioro gradual de la clorofila, causando que las hojas cambien de verde a amarillo o incluso blanco antes de marchitarse y caer. La deficiencia de nitrógeno también afecta las raíces, especialmente si ocurre en las etapas tempranas de crecimiento, lo que resulta en un desarrollo limitado y una formación incompleta de los órganos de la planta (Mengel, 2000).

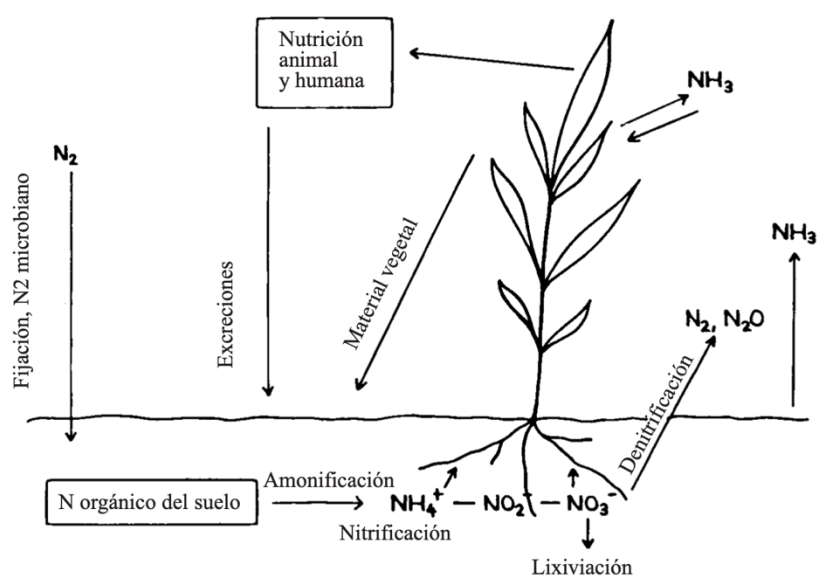


Imagen 2. Ciclo del nitrógeno en la naturaleza (Mengel, 2000).

El fósforo es otro de los macronutrientes esenciales para las plantas, ya que desempeña un papel crucial en la transferencia de energía en todo el organismo vegetal. Contribuye a la construcción de las membranas celulares, el ADN, las proteínas y las enzimas. Las zonas de mayor concentración de fósforo son las raíces, las puntas de crecimiento y el tejido vascular, es decir, las áreas en desarrollo de la planta. Durante las etapas tempranas de su vida, las plantas jóvenes requieren cantidades significativas de fósforo para un crecimiento adecuado, siendo el primer cuarto de vida cuando más fósforo absorben (Quevedo, 1901).

Las plantas que sufren de una deficiencia de fósforo experimentan un crecimiento lento y generalmente tienen una proporción baja de peso seco entre la parte aérea y las raíces. En los cereales, esto afecta la formación de tallos laterales. Los árboles frutales muestran un crecimiento reducido en sus nuevos brotes, y a menudo tienen problemas en el desarrollo y apertura de las nuevas flores. La producción de frutas y semillas también disminuye significativamente en plantas con deficiencia de fósforo. Como resultado, se obtienen cosechas de baja calidad, con rendimientos reducidos tanto en cantidad como en calidad de frutos y semillas (*Mengel, 2000*).

Usualmente, los síntomas de la deficiencia de fósforo se manifiestan en las hojas más maduras, las cuales tienden a tener un color verde oscuro. En muchas plantas anuales con deficiencia de fósforo, los tallos presentan una coloración rojiza debido a una mayor producción de antocianinas. En árboles frutales con deficiencia de fósforo, las hojas también tienden a adquirir tonalidades oscuras y caen prematuramente (*Mengel, 2000*).

El potasio es el último de los tres macronutrientes primarios, este ayuda al transporte de agua a lo largo de la estructura de la planta y regula la apertura y cierre de las estomas, lo que contribuye a su salud y vigor. La deficiencia de potasio puede resultar en una disminución en la transpiración, lo que lleva a un aumento en la temperatura de las hojas y puede causar quemaduras, especialmente en los bordes de las hojas (*Quevedo, 1901*).

Cuando las plantas carecen de potasio, los síntomas suelen manifestarse en las hojas. Los bordes de las hojas pueden volverse grises y luego marrón oscuro, con signos de marchitez y enrollamiento. Además, las hojas pueden mostrar un patrón de amarilleo desde los bordes hacia los nervios, junto con la aparición de manchas marrón oscuro de tejido muerto. El exceso de sal, como el sodio, alrededor de las raíces puede contribuir a la deficiencia de potasio al bloquear la absorción de nutrientes por parte de las raíces (*Mengel, 2000*).

Dentro de los macronutrientes secundarios se encuentra el magnesio, el cual desempeña múltiples funciones vitales en las plantas. Aunque solo constituye una fracción relativamente pequeña del magnesio total de la planta asociado con la clorofila, aproximadamente del 15

al 20%, su importancia trasciende esta asociación. Además de su papel crucial en la estructura de la clorofila, el Mg^{2+} participa en una serie de procesos fisiológicos esenciales. Una de sus funciones principales es servir como cofactor en la activación de enzimas implicadas en procesos de fosforilación. El Mg^{2+} actúa como un puente entre la estructura del pirofosfato del ATP o ADP y la enzima correspondiente (Walker 1974).

Según Balke y Hodges (1975), este puente facilita la activación de la ATPasa por parte del Mg^{2+} . Además de las fosfoquinasas, otras enzimas como las dehidrogenasas y la enolasa también son activadas por el Mg^{2+} . Aunque la reacción del Mg no es específica en estas enzimas, el Mn^{2+} a menudo actúa como el activador más eficiente. Además, el Mg^{2+} tiene la función de activar la ribulosa bisfosfato carboxilasa, esto mediante el transporte de Mg^{2+} al estroma del cloroplasto en intercambio con H^+ , lo que crea un entorno propicio para la actividad de la carboxilasa (Walker 1974).

El uso de fertilizantes juega un papel fundamental en cubrir las necesidades de nutrientes en los cultivos de la industria agrícola, existen varios tipos de fertilizantes, pero en general se dividen en dos grandes grupos, los fertilizantes orgánicos y los fertilizantes químicos (Quevedo, 1901).

Un fertilizante químico es un término general para todas las sustancias que contienen los principios básicos de la fertilidad del suelo en forma concentrada (nitrógeno, potasio o fósforo), ya sea como sustituto de los fertilizantes orgánicos o como suplemento de nutrientes (Navarro, 2023). En los fertilizantes, se incluyen nitratos, diversas sales de amonio, fosfatos y sus derivados, y sales de potasio, es decir, compuestos que representan sales químicas definidas, algunas de las cuales se obtienen mediante procedimientos y reacciones químicas para obtener formas comerciales, como las sales de amoníaco y los superfosfatos (Quevedo, 1901).

Los fertilizantes que contienen solo uno de los tres macronutrientes principales (N, P o K), se les denomina fertilizantes simples, los cuales se dividen en tres grupos principales, siendo estos los fertilizantes nitrogenados, fertilizantes fosfatados y fertilizantes potásicos.

Los fertilizantes nitrogenados suministran a las plantas nitrógeno aún y cuando este contenga algún otro elemento en menor proporción. Están comprendidos en este grupo los nitratos, sales amoniacales, urea, entre otros (Quevedo, 1901).

Las fuentes de nitrógeno utilizadas en los fertilizantes son comúnmente en forma anión nitrato (NO_3^-) y catión amonio (NH_4^+). En donde el NH_4^+ es parcialmente adsorbido en los coloides del suelo y su tasa de absorción es generalmente menor que la de NO_3^- bajo condiciones de campo. Por esta razón la mayoría de los cultivos no responden como rápidamente a los fertilizantes de NH_4^+ en cuanto a los aplicados como NO_3^- , puesto que los fertilizantes de nitrato se conocen por producir una rápida respuesta en la planta. En la mayoría de los casos, sin embargo, la diferencia entre ambos tipos de fertilizantes tiene una menor importancia (Mengel, 2000).

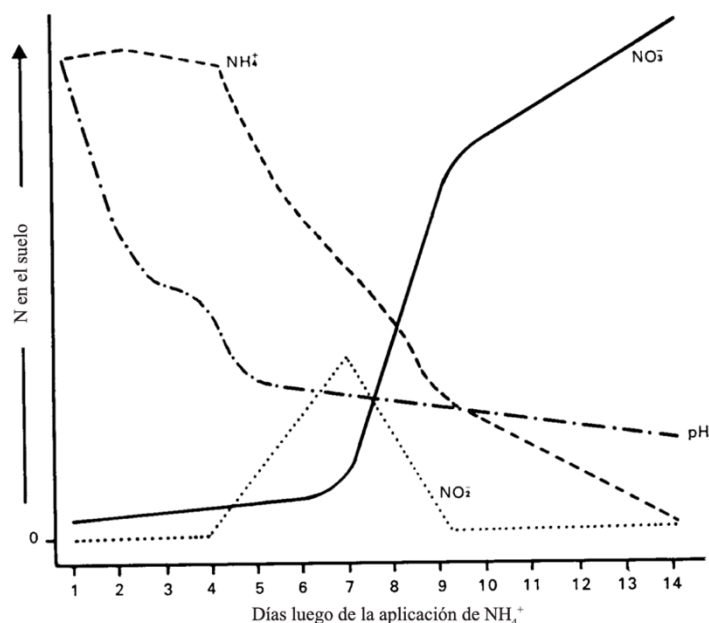


Imagen 3. Afecto de la aplicación de nitrógeno en el suelo (Mengel, 2000).

De manera general, entre todas las mejoras de nutrientes realizadas en los suelos, la aplicación de fertilizantes nitrogenados ha tenido los mejores efectos significativos en términos de aumentar la productividad de los cultivos. Diversos estudios realizados en el

campo han demostrado que, para muchos suelos, el nitrógeno es el factor limitante más crucial para el crecimiento de las plantas (*Mengel, 2000*).

Por otro lado, los fertilizantes fosfatados suministran a las plantas principalmente el ion fosfato de hidrogeno $(\text{HPO}_4)^{-2}$ necesario para cumplir su requerimiento de F en su alimentación (*Sela, 2024*). Su fuente comprende los fosfatos minerales naturales, fosfatos de huesos, guanos fosfatados, entre otros compuestos fosfatados con tratamientos previos con ácido sulfúrico (*Quevedo, 1901*).

Los fertilizantes fosfatados utilizados en la actualidad presentan diferencias en su composición y solubilidad química, sin embargo los superfosfatos son una de las fuentes principales en la creación de estos. El superfosfato se produce al tratar fosfato de roca molido con ácido sulfúrico, lo que resulta en una mezcla de $\text{Ca}(\text{HPO}_4)_2$ y yeso (CaSO_4). En la fabricación del superfosfato triple, se emplea ácido fosfórico en lugar de ácido sulfúrico, lo que produce $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (*Mengel, 2000*).

Sin embargo, se ha demostrado que, bajo condiciones tropicales, donde los fosfatos solubles se lixivian fácilmente en suelos ácidos arenosos, la aplicación de fosfatos de roca puede ser una mejor alternativa, dado que experimentos en cultivos de caña de azúcar en Hawaii mostraron que el fosfato de roca es tan efectivo como el superfosfato, reduciendo el riesgo de lixiviaciones (*Ayres y Hagihara, 1961*). Además, los efectos del fosfato de roca se han observado que son favorables en el crecimiento de trigo, soja, frijoles y maíz (*Mandal, 1975*).

Por su parte los fertilizantes potásicos, provienen de las sales potásicas extraídas del agua de mar, cenizas vegetales, extraídas de yacimientos salinos, las cuales son las fuentes principales para dar a las plantas la potasa que necesite como requerimiento (*Quevedo, 1901*). Los fertilizantes que contienen potasio suelen ser menos utilizados y aplicados en comparación con los fertilizantes ricos en nitrógeno y fósforo, principalmente debido a que el potasio tiende a estar más comúnmente presente en los suelos (*Quevedo, 1901*).

El potasio es proporcionado a los cultivos tanto en su forma directa como en compuestos. El cloruro de potasio (KCl), también conocido como muriato de potasio, es el fertilizante más común y económico utilizado para este fin. Este fertilizante contiene aproximadamente la mitad de potasio (K) en su composición (equivalente al 60% de óxido de potasio, K_2O). Además de esta concentración más alta, también están disponibles en el mercado otros tipos de fertilizantes con un grado inferior de potasio con un contenido de K del 41% o del 33%, lo que equivale al 58% o al 40% de óxido de potasio, respectivamente (*Mengel, 2000*).

A su vez existen los fertilizantes mezcla, los cuales están compuestos con dos o más macronutrientes principales (N, P, K), siendo el fertilizante NPK el más común. Dentro de los fertilizantes NPK se utiliza comúnmente una relación 15-15-15 lo que significa que existen una relación [1:1:1] entre los elementos, en donde a su vez se presentará que la concentración será de 15%N, 15% P_2O_5 y 15% K_2O sobre al peso total, esto muestra que el contenido de nutrientes se expresa en términos de P_2O_5 y K_2O en lugar de su elemento simple, P y K respectivamente, en contra parte con N que se toma el porcentaje en su elemento simple (*Mengel, 2000*).

En los últimos años, se ha observado un incremento en la importancia del magnesio (Mg) como fertilizante. Anteriormente, el Mg se aplicaba inadvertidamente como una impureza junto con otros fertilizantes. Sin embargo, debido a la alta pureza de los fertilizantes utilizados en la actualidad, esta fuente de aplicación de Mg al suelo ya no está disponible. Por esta razón, los mayores rendimientos obtenidos a partir de aplicaciones más elevadas de fertilizantes que no contienen Mg también han generado una mayor demanda de este elemento en los suelos (*Mengel, 2000*).

Los niveles más altos de potasio (K^+) o amonio (NH^+) en los fertilizantes pueden restringir la absorción de magnesio (Mg^{2+}) por parte de las plantas. Por estas razones, la deficiencia de Mg en los cultivos se está volviendo más común, lo que ha llevado a un aumento en las aplicaciones de Mg de manera más frecuente (*Mengel, 2000*).

Sin embargo, el uso de fertilizantes químicos de corta liberación puede traer consecuencias a largo plazo, puesto que pueden lixiviar nitratos al ser arrastrados por las lluvias, puesto que, cuando los nitratos presentes en los fertilizantes se disuelven en el agua y se filtran a través del suelo, llegan a contaminar las aguas subterráneas y superficiales, el cual a su vez puede ocasionar una eutrofización (Arias, 2004).

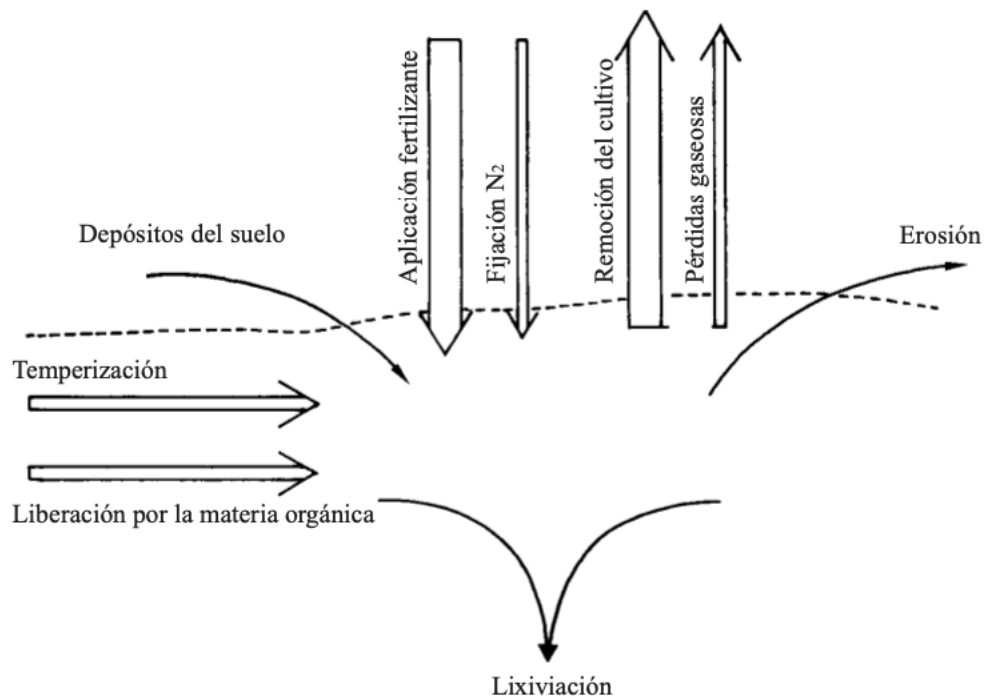


Imagen 4. Ganancias y pérdidas de nutrientes en el suelo (Mengel, 2000).

La eutrofización se describe como el proceso de deterioro en la calidad del agua debido al aumento excesivo de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo. Esto afecta su uso y tiene importantes repercusiones ecológicas, sanitarias y económicas a nivel regional (Ledesma, 2013).

1.2 Caracterización de la organización o comunidad

En un escenario marcado por la interacción entre agricultores, productores de fertilizantes y la industria tequilera ha generado una necesidad urgente de reducir los índices de contaminación del suelo, desatados por el creciente volumen de vinazas desechadas, cuyo

impacto ha ido en aumento en los últimos años. Estas preocupaciones medioambientales y la urgencia de utilizar estos residuos en el desarrollo de productos innovadores han impulsado el desarrollo de un fertilizante químico a partir de la vinaza tequilera.

La producción de un fertilizante químico con ingrediente activo el mineral de estruvita se concedió como una respuesta integral a la problemática planteada, cuyo propósito fundamental es en primer lugar, la obtención de un fertilizante químico de alta calidad compuesto por nitrógeno (N), magnesio (Mg) y fósforo (P) a partir de la materia orgánica presente en las vinazas; y en segundo lugar, la reducción efectiva de la contaminación asociada al tratamiento de este desecho.

Principalmente, en esencia la producción del fertilizante químico abarca diversas áreas funcionales las cuales forman un flujo continuo de procesos. La extracción y transformación de la materia prima, la cual está liderada por agricultores y las industrias tequileras, constituye la primera parte proceso. Posteriormente, la inclusión de ingeniería y tecnología innovadora para llevar a cabo el tratamiento de las vinazas y la producción de la estruvita.

Las personas involucradas en este proyecto son los agricultores, los cuales son los proveedores de la materia prima esencial, desempeñan un papel crucial en la cadena de suministro. Por otro lado, las industrias tequileras son las encargadas en liderar la transformación de las vinazas en productos de alto valor agregado. Por último, los productores de fertilizantes y también las industrias tequileras, serían los usuarios indirectos, ya que ambos se sitúan como catalizadores y potenciales beneficiarios de los resultados obtenidos.

1.3 Identificación de la(s) problemática(s)

En la elaboración de este proyecto se presentaron diversos obstáculos y desafíos. La presencia de alternativas en el mercado, como fertilizantes de bajo costo, que podría afectar directamente a la viabilidad del proyecto. Así mismo, la existencia de tratamientos de vinazas tequileras convencionales representa contratiempos potenciales que requieren ser abordados

con creatividad e innovación. Por otro lado, un factor a considerar son las regulaciones y normativas gubernamentales requeridas para un producto como el propuesto.

Sin embargo, se apostó por el enfoque en generar resultados tangibles y factibles. Las innovaciones tecnológicas que igualmente están destinadas a desarrollar nuevos fertilizantes y procesos de tratamiento de vinaza más convenientes son la motivación de este proyecto. No obstante, los riesgos planteados por la creación de un proceso tecnológico para el tratamiento de vinazas y la producción de un fertilizante innovador son significativos, los cuales podrían dificultar el desarrollo del prototipo y su posterior escalabilidad. Finalmente, la incertidumbre tecnológica debido a la innovación del proyecto existe un riesgo adjunto de que el proceso desarrollado no cumpla con las expectativas en términos de eficacia, eficiencia o rentabilidad, lo que podría poner en peligro la viabilidad del proyecto a largo plazo.

Así mismo, el análisis del mineral obtenido se deseaba examinar por Espectroscopia de Fotoelectrones por rayos X (XPS). Esta es una técnica de análisis superficial que mide la composición elemental, los estados químicos y la estructura electrónica de los materiales. Se utiliza un haz de rayos X para irradiar una muestra, provocando la emisión de fotoelectrones desde la superficie del material. Sin embargo, por cuestiones de mantenimiento del equipo no se pudo realizar el análisis deseado con ese equipo. Por consiguiente, se decidió que la muestra se estudiará por microscopia SEM y EDS. La técnica SEM utiliza un haz de electrones en lugar de luz para formar una imagen de alta resolución de la superficie de una muestra y por otro lado, el EDS es una técnica complementaria a SEM que permite identificar la composición elemental de la muestra analizada (*Goldstein, 2018*).

Mientras XPS es una técnica excepcional para analizar la composición y los estados químicos de las superficies hasta unos pocos nanómetros, SEM combinado con EDS ofrece la capacidad de visualizar la morfología de la superficie y determinar la composición elemental de áreas más extensas y en mayor profundidad. Estas técnicas son complementarias y pueden proporcionar una comprensión integral de la naturaleza de un mineral (*Goldstein, 2018*).

1.4. Planeación de alternativa(s)

Metodología pirólisis:

La pirólisis es un proceso térmico que descompone la biomasa en ausencia de oxígeno o con una cantidad muy limitada de oxígeno. Este proceso genera una serie de productos gaseosos, líquidos y sólidos, que pueden ser utilizados como combustibles, productos químicos o materiales de construcción, en el caso del proyecto como un ingrediente activo en el fertilizante (*Penedo, 2008*).

Este proceso tiene varias ventajas, incluyendo la capacidad de utilizar una amplia variedad de materiales de biomasa (vinaza) como materia prima, la producción de una gama diversa de productos útiles y la reducción de residuos sólidos. Sin embargo, también presenta desafíos, como la necesidad de controlar cuidadosamente la temperatura y la composición del gas de entrada para evitar la formación de productos no deseados, tales como alquitrán y gases contaminantes (*Penedo, 2008*).

Para investigar la descomposición de la vinaza tequilera, se deberá emplear un equipo a escala de laboratorio, cuyo diseño se muestra en la **imagen 4**. La descomposición térmica ocurre de manera intermitente; el equipo consta de un horno eléctrico, un sistema de condensación y una bomba de vacío que elimina los productos volátiles de la zona de reacción. La muestra de biomasa se coloca dentro del horno en forma de briqueta; el horno debe cerrarse herméticamente para evitar la entrada de aire, y luego se inicia el proceso de calentamiento hasta alcanzar la temperatura final deseada (*Penedo, 2008*).

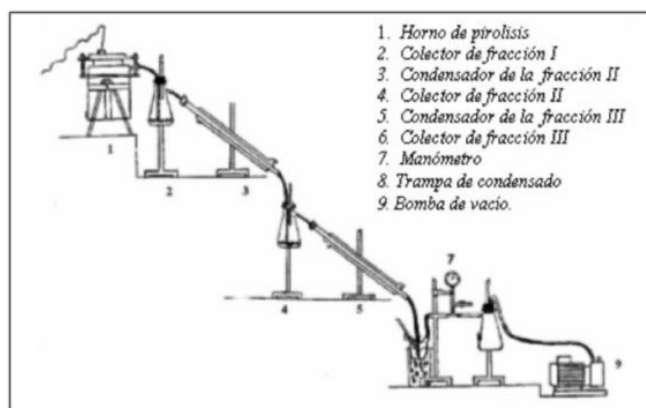


Imagen 4. Diagrama del sistema de la metodología de pirolisis en biomasa (Medina, 2008).

En cada experimento, se mantiene una configuración constante. La bomba de vacío, ubicada al final del sistema de separación, facilita la extracción rápida de los productos volátiles generados en la zona de reacción y su circulación a través del sistema de separación, lo que asegura un enfriamiento rápido en tres etapas (Penedo, 2008). Durante la reacción de pirólisis, se forma carbón vegetal y una mezcla de vapor y gas que atraviesa el sistema de separación. El alquitrán, un subproducto de la reacción que se mezcla con los gases y vapores en forma de aerosol, se separa en una primera etapa mediante un frasco colector colocado al salir del horno de pirolisis, denominado fracción 1 (Penedo, 2008)

En las dos etapas de condensación siguientes, se recolectan las fracciones líquidas II y III. El recipiente que acumula la fracción III se sumerge en agua helada para lograr una mayor condensación de los vapores. Al final del sistema de condensación, se coloca un frasco trampa para evitar que las gotas de líquido de pirolisis sean arrastradas hacia la bomba de vacío (Penedo, 2008).

Metodología cristalización de estruvita:

En base a la investigación llevada a cabo se obtuvo que una manera de poder extraer el nitrógeno (N) y fósforo (P) presentes en líquidos ricos en materia orgánica (vinaza) es mediante la cristalización de estruvita. La estruvita es mineral rico en fosfato de magnesio y amonio hexahidratado. Su fórmula química es: $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$, este mineral se encuentra de forma natural en sistemas geoquímicos, tiene una baja solubilidad (0.2 g L⁻¹ en agua) y contiene 5,7% de nitrógeno (N), 12,6% de fósforo (P) y 16.40% de magnesio (Mg) (Fernández, 2015).

La estruvita es considerada una fuente alternativa para la sustitución de fertilizantes químicos, esto gracias a su contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y magnesio (Mg) previamente mencionado. Además, la estruvita es un fertilizante de liberación lenta, lo que significa que los nutrientes se liberan gradualmente a lo largo del tiempo, lo cual reduce el riesgo de lixiviación, contaminación del suelo y aguas subterráneas (*Fernández, 2015*).

Para esta metodología se explorarán diversas proporciones molares estequiométricas de los siguientes compuestos: [Mg:NH₄:PO₄] utilizando un volumen de 0.1 litros de digesto resultante de la digestión ácida de la vinaza según el método Kjeldahl. Inicialmente, se añadirá la cantidad calculada de MgO correspondiente al contenido de nitrógeno en el digesto, agitando la mezcla hasta la completa disolución del óxido de magnesio. Posteriormente, se incorporará la cantidad calculada de ácido fosfórico. Tras la adición de ambos reactivos, se mezclará con una solución de NaOH al 50% hasta alcanzar un pH de 9. Una vez logrado el pH alcalino, se transferirá la mezcla a un agitador a 100 rpm durante 30 minutos, seguido de un periodo de al menos una hora de reposo para permitir la precipitación. Finalmente, se procederá a separar y recuperar el precipitado del sobrenadante, llevándolo a una estufa de desecado a 40°C durante 48 horas (*Fernández, 2015*).

Metodología electrocoagulación:

La Electrocoagulación es un proceso electroquímico en el cual el ánodo se disuelve para formar complejos, los cuales atrapan la materia orgánica coloidal (remueven la DQO) presente en el líquido residual. La técnica consiste en tratar la vinaza con corriente eléctrica de bajo amperaje, a través de electrodos de aluminio o acero galvanizado, para generar complejos de hidróxidos metálicos que atrapan y aglomeran las partículas presentes en el líquido (*Rodríguez, 2021*).

Para la obtención del sólido a partir de la vinaza se utilizó un electro coagulador a escala de laboratorio el cual está compuesto por 2 electrodos planos de aluminio, dispuestos verticalmente, cuyas dimensiones totales son de 7,10 cm de largo, 3,85 cm de ancho, y 0,66 cm de espesor, espaciados 1,5 cm, y un área de 61,51 cm². Para energizar el sistema se utilizó una fuente de corriente directa, en la que se podía regular la corriente y el voltaje aplicado;

mediante la conexión de un amperímetro y un voltímetro, en serie y paralelo respectivamente. Los electrodos fueron conectados en paralelo (Rodríguez, 2021).

Metodología lagunas anaeróbicas:

Una alternativa para lograr una digestión anaeróbica sin el uso de un biorreactor o un biodigestor son las lagunas anaeróbicas, ya que como su nombre lo indica, las lagunas anaeróbicas degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Las lagunas anaeróbicas usadas como tratamiento primario en la industria en aguas residuales con alto contenido de materia orgánica (Peñafliel, 2016). Constan de una estructura simple, formada por un cuenco de 5-10 m de profundidad de forma convexa con protecciones en el fondo y a los costados para evitar la infiltración del agua residual presente, cuentan con una entrada y salida en donde entre el afluente y sale el efluente, además no necesitan estar selladas herméticamente debido a que la alta cantidad de materia orgánica impide la formación de oxígeno dentro de la laguna, razón por la cual son llamadas lagunas anaeróbicas (Middlebrooks, 1982).

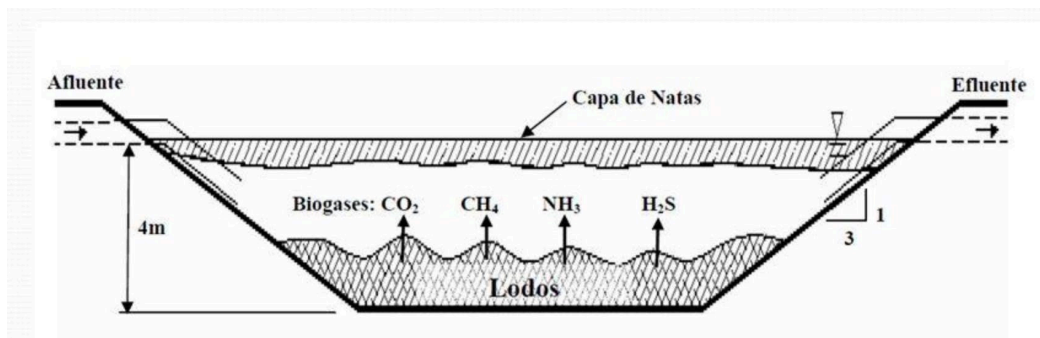


Imagen 5. Representación de una laguna anaeróbica.

El principio de funcionamiento consta de tres etapas, hidrólisis, formación de ácidos y formación de metano (Middlebrooks, 1982).

La hidrólisis implica la transformación de compuestos orgánicos complejos e insolubles en otros más simples y solubles en agua, esencial para proporcionar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaerobia y su utilización por las bacterias en las siguientes etapas (Peñafliel, 2016). En formación de ácidos ocurre la conversión de los compuestos

orgánicos simples generados previamente en ácidos orgánicos volátiles, principalmente ácido acético, propiónico y butírico, realizada por bacterias anaerobias o facultativas. Aunque esta etapa ocurre rápidamente, la reducción de la DBO o DQO es mínima debido a la poca estabilidad de los productos (*Middlebrooks*, 1982).

Por último, en la formación de metano, las bacterias utilizan los ácidos orgánicos para producir metano y dióxido de carbono. La liberación de estos gases, son indicadores de un buen funcionamiento en las lagunas anaerobias, lo cual es esencial para la eliminación de materia orgánica (*Peñafiel*, 2016).

Si bien, a pesar de la formación de metano dentro de las lagunas anaerobias, el metano producido no es una cantidad considerable para su uso o aprovechamiento ya que su formación solo se ve manifestada en pequeñas burbujas, lo cual dificulta su recolección al no estar sellado herméticamente, no obstante, nuestro objetivo principal es convertir el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal, haciendo que este sea de una forma asimilable en el proceso de formación de estruvita, lo cual hace que las lagunas anaeróbicas sean una opción económica si solo se busca transformar el nitrógeno presente en las vinazas en una forma NH_4^+ (*Middlebrooks*, 1982).

Metodología ácido fosfórico:

La metodología de adición de ácido fosfórico fue propuesta como una alternativa para la conversión del nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal (NH_4^+), si bien se requiere de una digestión anaeróbica en la mayoría de los casos para lograr esta conversión, al agregar ácido fosfórico por medio de su ion PO_4^- manteniendo una relación [500:7:1] de DQO:N:P puede tener un efecto de digestión convirtiendo una fracción del nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal (Walter, 2016). Sin embargo, el efecto de digestión puede ser poco con respecto a otras metodologías, además a temperatura ambiente sería muy tardado por lo que tendría que hacerse a una temperatura alta añadiendo una operación de calentamiento, lo que en relación costo con respecto al nitrógeno amoniacal obtenido no sería el más adecuado (Walter, 2016).

Selección de metodología:

La metodología seleccionada fue la de la cristalización y precipitación de estruvita, debido a que es una fuente rica en fosfato, un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas. Además, contiene nitrógeno y magnesio, que son nutrientes importantes para el desarrollo vegetal. Así mismo, tiene la capacidad de liberar gradualmente los nutrientes en el suelo a medida que se descompone, lo que proporciona un suministro constante de nutrientes a las plantas durante un período prolongado. Esto puede mejorar la eficiencia de la fertilización y reducir la lixiviación de nutrientes hacia las aguas subterráneas. Finalmente, el uso de estruvita como fertilizante puede ayudar a reducir la contaminación del agua, ya que captura y recicla los nutrientes presentes en aguas residuales o efluentes agrícolas. Esto evita la liberación descontrolada de nutrientes en cuerpos de agua, lo que puede provocar la eutrofización y afectar negativamente a los ecosistemas acuáticos.

Como bien se mencionó previamente, la estruvita es un mineral cuya fórmula química es $(\text{NH}_4)\text{Mg}(\text{PO}_4)6\text{H}_2\text{O}$, y también se le conoce como fosfato de magnesio y amonio hexahidrato. La estruvita es un mineral biogénico, esto significa que se forma en condiciones asociadas con organismos biológicos, a menudo en presencia de descomposición o putrefacción. Este mineral se encuentra comúnmente en el estiércol, el guano, los cálculos urinarios, el pescado enlatado y los cadáveres sumergidos en agua de mar. Sin embargo, últimamente también se ha cristalizado en lagunas de desechos y plantas de tratamiento de aguas residuales como parte de los esfuerzos para reciclar el fósforo de dichas corrientes residuales y reducir su contaminación por fósforo de las aguas superficiales (CEEP, 2001).

La estruvita es un mineral blando con una dureza de 1,5 a 2 Mohs, una gravedad específica de 1,711 y un sistema cristalino ortorrómbico. El término sistema cristalino ortorrómbico, se refiere a un sistema cristalino específico caracterizado por tres ejes los cuales son mutuamente perpendiculares y desiguales en longitud. En este sistema, los tres ejes tienen diferentes longitudes, pero los tres tienen ángulos que miden 90° . Uno de los elementos característicos de este sistema es que se tiene un eje de simetría de orden 2 (Clark, 2021). La

estruvita se caracteriza por ser incoloro, o tener un color blanquecino, amarillento o pardusco en su forma natural y con un brillo vítreo. Así mismo, este mineral es isoestructural con el Grupo Estruvita, que incluye el análogo de amonio de la Estruvita-(K) (*Ulex*, 1845).

Como se ha estudiado, la estruvita suele ser producto de la descomposición orgánica en materia putrescente, alimentos enlatados u otra acción bacteriana sobre compuestos orgánicos. También se encontró que este mineral es constituyente en cálculos en los riñones y las vejigas de los humanos, específicamente en orinas alcalinas e infectadas. Los cálculos de estruvita, o bien cálculos de triple fosfato o cálculos infecciosos, son un tipo común de análisis de fosfato de magnesio y amonio en el sistema urinario y renal. Es importante mencionar que la estruvita se crea cuando bacterias, como *Proteus* o *Klebsiella*, ingresan al cuerpo y descomponen la urea presente en la orina en amoníaco, lo que tiene como consecuencia un aumento del pH de la orina y por consiguiente la creación de estruvita (*Clark*, 2021).

Sin embargo, para las plantas la estruvita presenta un escenario totalmente diferente. La estruvita se ha mostrado prometedora para su uso en la agricultura como una fuente alternativa de fertilizante, aportando fósforo, nitrógeno y magnesio. Tanto en los estudios realizados de invernadero como en los de cultivos en hileras se identificó que la estruvita es un compuesto fertilizante viable, en comparación con los fertilizantes tradicionales. Se obtuvo de la literatura que el grado fertilizante de este mineral es de aproximadamente 6-28-0, sin embargo, la falta de potasio se contrarresta con la presencia del magnesio, ya que este contiene aproximadamente un 16 % de MgO (*Omidire*, 2019).

Por otro lado, el análisis económico sugiere que la estruvita también puede resultar una fuente de fertilizante económicamente viable, particularmente debido a que las reservas de fosforo no renovable se han vuelto escasas. Sin embargo, es importante señalar que la eficacia de la estruvita como fertilizante fosfatado puede verse afectada por el pH y la presencia de compuestos exudados de las raíces de las plantas, tales como los ácidos orgánicos (*Omidire*, 2019).

Tabla 1. Características del mineral estruvita.

Parámetro	Descripción
Composición química	Fosfato de amonio y magnesio (NH ₄ MgPO ₄ ·6H ₂ O)
Fórmula química	(NH ₄)MgPO ₄ ·6H ₂ O
Aspecto	Cristales prismáticos
Dureza	3.5 - 4 en la escala de Mohs
Nivel de liberación de nutrientes	Fertilizante de liberación lenta
pH óptimo para formación	Alcalino (pH > 7)
Temperatura óptima para formación	Generalmente a temperatura ambiente (depende de las condiciones)

1.5. Desarrollo de la propuesta de mejora

La vinaza de tequila fue proporcionada por la tequilera “La tarea” la cual está ubicada en San Juanito de Escobedo, Jalisco, México. A esta vinaza se le denominó *lote #1* y la vinaza proporcionada por la tequilera “La purísima” ubicada en Santa Cruz del Astillero, Jalisco, México se le denominó como *lote #2*. Ambas fueron almacenadas en frascos cerrados, manteniéndolas a una temperatura de 279 K (5.85 °C), cabe mencionar que todos los métodos realizados posteriormente mencionados fueron realizados a ambos lotes de vinazas.

La caracterización fisicoquímica de la vinaza cruda fue hecha por medio de la medición del pH, análisis de fosfatos utilizando un equipo HANNA HI 96717 Phosphate High Range, la medición de nitritos y nitratos mediante tiras reactivas, y el DQO (mgL'). Así mismo, otras caracterizaciones fueron llevadas a cabo, se utilizó el método de destilación Kjeldahl para determinar el nitrógeno orgánico total (NMX-AA-026-SCFI-2010), y el nitrógeno amoniacal mediante una titulación con ácido sulfúrico.



Imagen 6. Medición de pH, nitritos y nitratos con tiras reactivas.



Imagen 7. Método Kjeldahl: Digestión ácida.



Imagen 8. Método Kjeldahl: Destilación y Titulación.



Imagen 9. Medición fosfatos con equipo HANNA HI 96717.

A continuación, en las siguientes tablas se presentan los resultados preliminares de la caracterización del lote #1 y lote #2 de vinazas:

Tabla 2. Caracterización vinaza lote #1.

Resultados experimentales #Lote 1			
Parámetro	Método analítico	Unidad	Entrada (vinaza cruda)
Nitrógeno orgánico total (Kjeldahl)	NMX-AA-026-SCFI-2010	mg/L	572.24
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	NMX-AA-026-SCFI-2010	mg/L	7.63
Nitratos (N)	NMX-AA-079-SCFI-2001	mg/L	<0.100
Nitritos (N)	NMX-AA-099-SCFI-2006	mg/L	<0.0099
Fosfatos	NMX-AA-029-SCFI-2001	mg/L	31
pH en laboratorio	NMX-AA-008-SCFI-2016	NA	3.71
DQO	NMX-AA-030/1-SCFI-2012	mg/L	46,760.0

Tabla 3. Caracterización vinaza lote #2.

Resultados experimentales #Lote 2			
Parámetro	Método analítico	Unidad	Entrada (vinaza cruda)
Nitrógeno orgánico total (Kjeldahl)	NMX-AA-026-SCFI-2010	mg/L	131.929
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	NMX-AA-026-SCFI-2010	mg/L	7.63
Nitratos (N)	NMX-AA-079-SCFI-2001	mg/L	<0.100
Nitritos (N)	NMX-AA-099-SCFI-2006	mg/L	<0.0099
Fosfatos	NMX-AA-029-SCFI-2001	mg/L	27
pH en laboratorio	NMX-AA-008-SCFI-2016	NA	3.45
DQO	NMX-AA-030/1-SCFI-2012	mg/L	89,498.0

Una vez terminada la caracterización fisicoquímica de ambos lotes de vinaza se prosiguió a realizar la metodología planteada en la sección 1.4 pero utilizando directamente la vinaza cruda. Cabe mencionar que para las experimentaciones llevadas a cabo se concluyó que era más conveniente utilizar la vinaza del lote #1 debido a los resultados obtenidos en su caracterización. Se realizó esta primera prueba con la finalidad de tener un punto de comparación de dos distintos procesos.

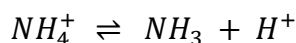
Se encontró en la literatura estudiada que las variables a considerar para la formación de la estruvita es la relación molar de los compuestos, el tiempo de reacción, el método de adición, la temperatura, alcalinidad, fuerza iónica y presencia de otros iones (*Di Laconi, et al., 2009*). Sin embargo, se encontró que varios autores llegaban a la conclusión que las variables más significativas para la cristalización de estruvita es el pH, la relación molar y la velocidad de agitación (RPM) es por esto que se decidió que éstas fueran las variables controladas en el proceso de cristalización (*Shin & Lee, 1997*) (*Kataki, et al., 2016*). Para obtener las proporciones molares estequiométricas de los

compuestos $[Mg:NH_4:PO_4^{3-}]$ se siguió el método propuesto por *Di Laconi*. Como este método es utilizado para el tratamiento de lixiviados provenientes de aguas residuales, se tuvo que adaptar al tratamiento de vinazas. Fue necesaria la modificación de las RPM, y una variación en las cantidades de H_3PO_4 y MgO . Los cálculos para poder obtener las cantidades de estos compuestos se calcularon tomando en cuenta las proporciones molares planteadas por *Di Laconi* para cada compuesto y a partir del valor obtenido de nitrógeno amoniacal presente en las vinazas. A continuación, en la tabla 4. se pueden observar las cantidades calculadas.

Tabla 4. Cantidades requeridas de los reactivos.

Masa molar de cada componente			Relación molar (moles requeridos de cada reactivo)	Gramos finales requeridos	mL finales requeridos
Mg	24.3050	g/mol	2	0.3187	-
PO4	94.9698	g/mol	1	-	4.7450
NH4	56.4650	g/mol	1.1	-	4.9221

Por otro lado, para poder seleccionar el valor del pH se tomó en cuenta el impacto de dicha variable en la concentración del ion amonio. El pH de una solución afecta la concentración de iones amonio (NH_4^+) y amoníaco (NH_3) a través de la reacción de equilibrio que se presenta a continuación:



Ecuación 1. Reacción de equilibrio.

En un rango normal de pH de la sangre, la proporción de NH_4^+/NH_3 es aproximadamente 100, lo que indica que la mayor parte del amonio se encuentra en forma de NH_4^+ . En el caso de la estruvita, el ion amonio (NH_4^+) es un ion cargado positivamente que puede afectar la solubilidad y la reactividad del mineral. El pH también puede afectar la actividad enzimática, la estabilidad estructural y la solubilidad, así como la carga y la distribución de carga en los sustratos, productos y coenzimas. A un pH de 7 a 9, el ion amonio (NH_4^+) es la forma dominante, mientras que, a un pH más bajo, la forma de amoníaco (NH_3) se vuelve más frecuente (*Chaplin, 2014*). Este comportamiento se puede observar en el siguiente gráfico:

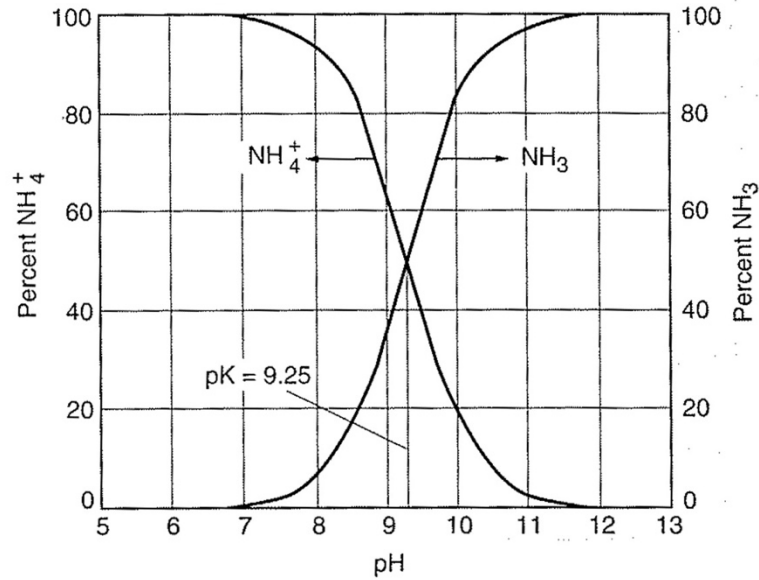
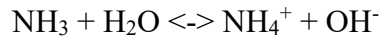


Imagen 10. Relación del pH con el amoníaco y el ion amonio (Chaplin, 2014).

Sin embargo, a pesar de que en un pH de 7 el porcentaje de los iones amonio son de aproximadamente el 100% y esta concentración sería la ideal para tener una alta eficiencia en el fertilizante, no es posible utilizar ese pH (Chaplin, 2014). Se investigó en distintos estudios realizados y se obtuvo que el pH perfecto para la cristalización de la estruvita como fertilizante es de 9 ya que proporciona el mayor contenido en fosfato y pureza como la estruvita (González-Morales, 2021). Así mismo, la velocidad cinética se ve afectada por el pH de la solución, observándose la velocidad cinética más alta a un pH de 9. La velocidad cinética de formación de estruvita es la velocidad a la que se produce el proceso de cristalización de estruvita. Esta velocidad puede verse afectada por varios factores, como bien se mencionó con anterioridad el pH de la solución, el caudal, el tiempo de residencia y la concentración de los reactivos. Por lo que, a un pH de 9, la concentración de los reactivos es máxima lo que lleva a un proceso de cristalización más rápido. A niveles de pH más bajos, la concentración de los reactivos es menor, lo que lleva a un proceso de cristalización más lento (Corona, 2022).

Por otro lado, la actividad del amoníaco se ve afectada por la fuerza iónica y la temperatura de la solución. Es importante tener en cuenta que, mientras el amoníaco molecular puede ser perjudicial para los organismos acuáticos, el ion de amonio es prácticamente inofensivo

(Hach, 2024). La ecuación química que describe la relación entre el amoníaco y el amonio es la siguiente:



Ecuación 2. Equilibrio químico amoníaco y amonio.

Este equilibrio se desplaza hacia la derecha cuando el pH es bajo y hacia la izquierda cuando es alto. A temperatura ambiente, con un pH inferior a 6, la cantidad de amoníaco en forma de NH_3 es muy baja y la mayoría del nitrógeno amoniacal está presente como NH_4^+ . A un pH de alrededor de 8, la proporción de NH_3 es del 10% o menos, y a un pH ligeramente superior a 9, la proporción aumenta a alrededor del 50%. Cuando el pH es > 11 , todos los iones de amonio en la solución se encuentran en forma de amoníaco molecular. La actividad del amoníaco acuoso también disminuye significativamente a temperaturas bajas (Hach, 2024).

La tasa cinética también se ve afectada por la tasa de flujo, tasas de flujo más altas conducen a una menor masa de estruvita. Esto se ocasiona debido a que un mayor caudal reduce el tiempo de residencia de los reactivos en la solución, lo que lleva a un período más corto para que ocurra el proceso de cristalización. El tiempo de residencia es otro factor importante que tiene un gran impacto en la tasa cinética, ya que tiempos de residencia más largos conducen a una mayor masa de estruvita. Esto se debe a que un tiempo de residencia más largo permite que se produzca más tiempo para el proceso de cristalización, lo que lleva a una mayor masa de estruvita (Corona, 2022).

Finalmente, la concentración de los reactivos también afecta la velocidad cinética, y concentraciones más altas conducen a un proceso de cristalización más rápido. Esto se debe a que una mayor concentración de reactivos proporciona más material para que se produzca el proceso de cristalización, lo que lleva a una velocidad de cristalización más rápida. A un pH de 9 se encontró que este valor mejora la eliminación y recuperación de fosforó (P) y nitrógeno (N) (Corona, 2022).

Sin embargo, cabe mencionar que la solubilidad de la estruvita disminuye a medida que aumenta el pH, alcanzando una solubilidad mínima en valores de pH entre 9 y 10.7. Por lo tanto, el aumento del pH mejora la eliminación y recuperación de fosforó (P) y nitrógeno (N), pero un valor de pH

alto también promueve la coprecipitación de los fosfatos de magnesio y calcio junto con la estruvita, lo que lo convierte en un producto menos valioso (Corona, 2022).

Una vez con los valores de las variables controladas del proceso definidos, se prosiguió a realizar diferentes pruebas con distintos valores de RPM y tiempo en la operación de mezclado, esto con la finalidad de poder llegar a la perfecta disolución y homogeneización de la mezcla. En la siguiente tabla se muestran los valores con los que se realizaron las pruebas:

Tabla 5. Diseño de experimentos tiempo de mezclado y velocidades de mezclado.

<i>Etapa</i>	<i>Tiempo de mezclado (min)</i>	<i>Velocidad de mezclado (RPM)</i>
1	20	100
	25	300
	30	500
2	10	100
	15	300
	20	500
3	10	100
	15	300
	20	500

En donde, la etapa uno se refiere a la adición del óxido de magnesio (MgO), la etapa dos a la adición del ácido fosfórico (H₃PO₄) y finalmente la etapa 3 al ajuste del pH con una solución de hidróxido de sodio (NaOH).

Al realizar las distintas pruebas se observó que para la etapa uno la velocidad de mezclado que presentaba mejores resultados era a 500 RPM, ya que se sabe que la solubilidad del óxido de magnesio en agua es muy baja. El producto de solubilidad (K_{sp}) del MgO es de $1.6 \times 10^{-11} \frac{\text{mol}^2}{\text{L}^2}$, que es la constante de equilibrio para la reacción de disolución del óxido de magnesio en agua. Sin embargo, la solubilidad de este compuesto en vinazas tequileras es afectada debido a la alta concentración de compuestos orgánicos y minerales presentes en la vinaza, los cuales pueden afectar dicha solubilidad (CHEM1102, 2004). Así mismo, se observó experimentalmente que el tiempo óptimo de agitación en esta etapa es de 30 minutos, esto para que la mezcla estuviera homogéneamente uniforme.

Por otro lado, la etapa dos consiste en la adición de ácido fosfórico. Para poder definir el valor óptimo de RPM para el mezclado fue necesario tomar en cuenta los siguientes puntos. Velocidades de agitación altas pueden aumentar la velocidad de disolución de los compuestos de fosfato. En otras palabras, la agitación a alta velocidad del ácido fosfórico podría mejorar su disolución y cinética de reacción. Sin embargo, altas velocidades podrían provocar reacciones violentas, salpicaduras o ebullición. Así mismo, se encontró en la literatura que la agitación excesiva durante los procesos de cristalización puede afectar negativamente la pureza y al tamaño del cristal. Por lo que, esto indica que es necesario controlar cuidadosamente la agitación a alta velocidad del ácido fosfórico durante la etapa de cristalización o precipitación para optimizar la calidad de la estruvita (Ma, 2010). Por ende, se decidió que el valor óptimo de agitación en esta etapa es de 300 RPM durante un tiempo de mezclado de 10 minutos.

Finalmente, la tercera y última etapa consistió en el ajuste del pH utilizando una solución de hidróxido de sodio (NaOH). Al ajustar el pH de una solución ácida con una base como el NaOH, el objetivo es lograr un cambio de pH controlado y gradual, por lo que una agitación rápida o alta puede no ser lo ideal. Debido a que, se podrían provocar altas concentraciones localizadas de la base, provocando un cambio de pH repentino e incontrolado. Así mismo, se debe de tomar en consideración que la vinaza tratada en una digestión se encuentra a valores de pH muy bajos de entre 0 y 1. Por lo que, al adicionar la solución básica de hidróxido de sodio, la cual es una base fuerte, se espera que haya una reacción muy violenta que se necesite controlar obligatoriamente (Ma, 2010). Es por esto que se recomienda un valor bajo de RPM para el mezclado, se seleccionaron 100 RPM para esta etapa y un tiempo de mezclado de aproximadamente 20 minutos, ya que este fue el que se midió que tardaba la mezcla en alcanzar el pH deseado.

En la tabla 5. que se presenta a continuación se pueden observar las condiciones de operación para cada etapa que mejores resultados presentaron en las pruebas:

Tabla 6. Tiempo de mezclado y velocidades de mezclado finales.

<i>Etapa</i>	<i>Tiempo de mezclado (min)</i>	<i>Velocidad de mezclado (RPM)</i>
1	30	500

2	10	300
3	20	100

Con todas las condiciones de operación definidas, primeramente, se prosigió a realizar estruvita utilizando compuestos puros. Se decidió realizar este procedimiento antes de iniciar la experimentación con la vinaza para poder comprender a profundidad el proceso de cristalización de estruvita. Para este experimento se utilizó hidróxido de amonio (NH_4OH), óxido de magnesio (MgO) y ácido fosfórico (H_3PO_4), y se realizó a las condiciones de operación previamente asignados y cumpliendo todos los parámetros establecidos. En las siguientes figuras se muestra la estruvita pura obtenida:

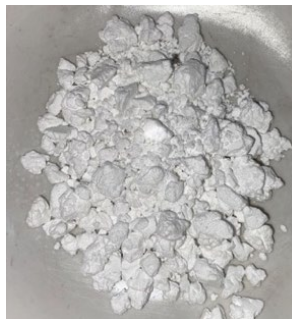


Imagen 11. Fertilizante químico compuesto por estruvita con compuestos puros.



Imagen 12. Fertilizante químico compuesto por estruvita con compuestos puros².

Posteriormente, se continuó realizando una última prueba con vinazas crudas. El procedimiento que se siguió para la realización de esta prueba se presenta en el siguiente diagrama:

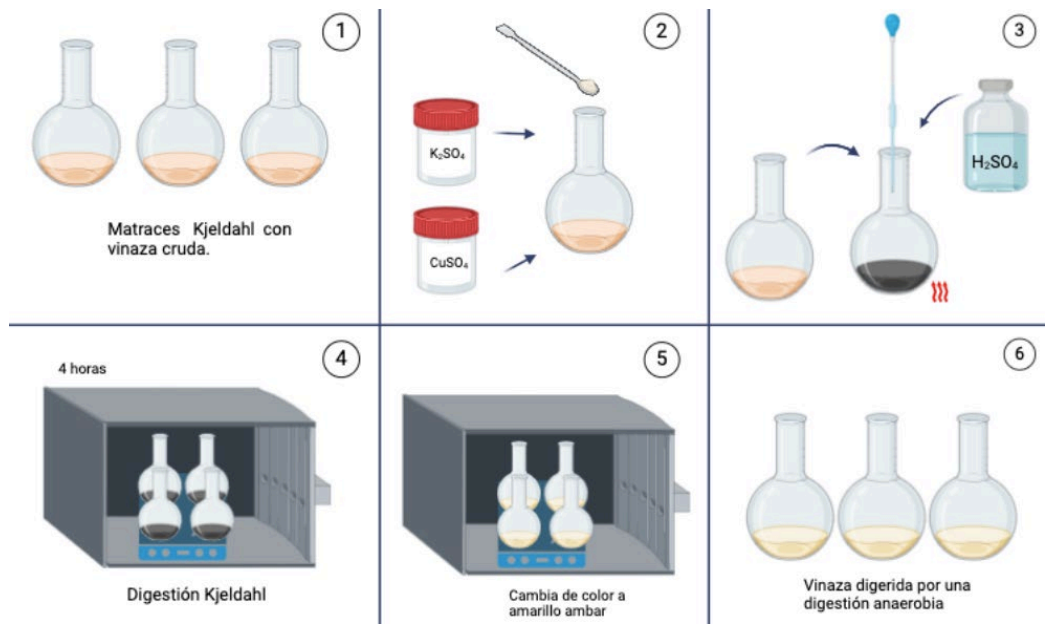


Imagen 13. Metodología de digestión ácida por el método Kjeldahl.

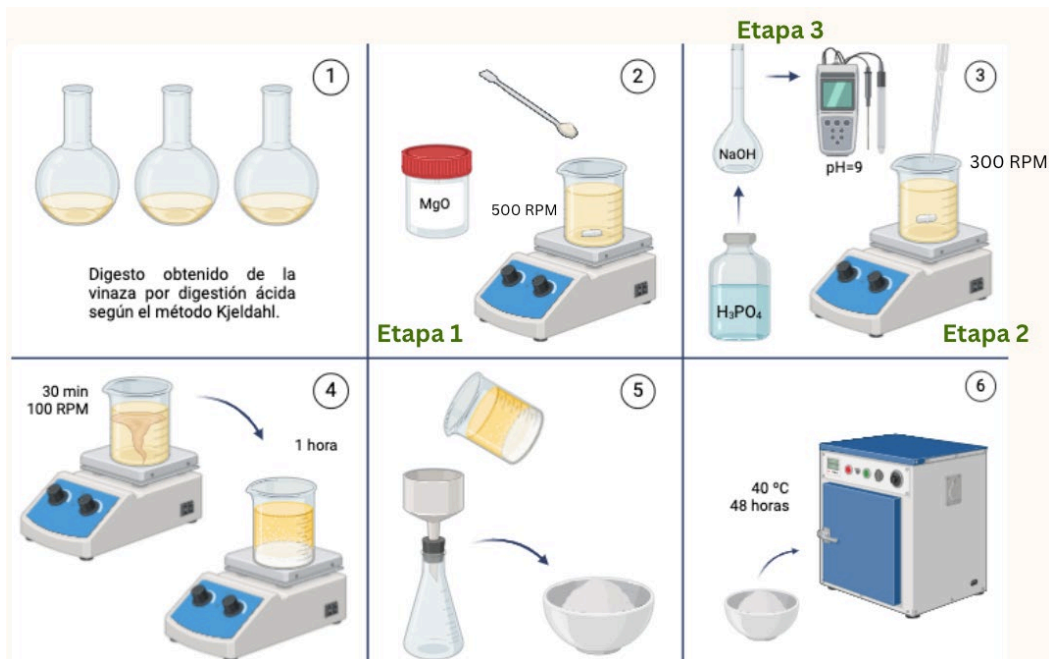


Imagen 14. Metodología cristalización de estruvita.

Por otro lado, cabe mencionar que para el proceso de cristalización de estruvita se decidió trabajar a temperatura ambiente debido a que, a temperaturas altas, la solubilidad de la estruvita en agua aumenta. Esto significa que se requeriría una mayor concentración de iones de magnesio, amonio y fosfato en la solución para poder iniciar el proceso de precipitación de esta. Por lo que, al disminuir

la temperatura, la solubilidad de la estruvita disminuye, lo que favorece su precipitación incluso a concentraciones más bajas de los iones necesarios (Corona, 2022).

Así mismo, para definir la temperatura de secado de la muestra se tomó en consideración la naturaleza del compuesto cristalizado, la estabilidad térmica de la sustancia, y los objetivos específicos del proceso de secado. Se investigó en la literatura que la temperatura de secado no debe exceder la temperatura a la que el compuesto es estable. Ya que, si esta se supera, podrían ocurrir descomposiciones, cambios en la estructura química o pérdida de solventes atrapados que son críticos para la estructura del cristal. Por lo tanto, se definió que una temperatura de aproximadamente 40°C grados centígrados aseguraría un secado suave sin causar daños térmicos en la muestra. También, se encontró que esta temperatura es ideal para compuestos orgánicos y biomoléculas (Corona, 2022).

En las siguientes figuras se puede observar la primera muestra obtenida de fertilizante químico compuesto por estruvita utilizando vinaza cruda (**Imagen 15**), en la segunda imagen se muestra fertilizante químico compuesto por estruvita utilizando vinaza tratada previamente mediante una digestión ácida (**Imagen 16**). Finalmente, en la **imagen 17**. se muestra fertilizante químico compuesto por estruvita obtenido a partir de vinaza cruda con una adición de fuente de sulfato de amonio simulando una previa digestión.



Imagen 15. Fertilizante químico compuesto por estruvita a partir de vinaza cruda.



Imagen 16. Fertilizante químico compuesto de estruvita a partir de digesto.



Imagen 17. Fertilizante químico compuesto de estruvita a partir de vinaza cruda con una adición de fuente de sulfato de amonio.

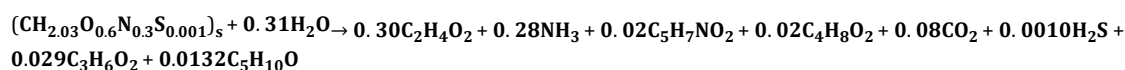
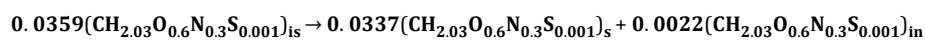
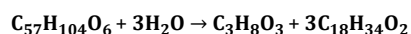
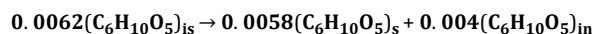
1.6. Valoración de productos, resultados e impactos

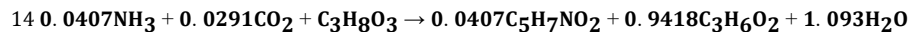
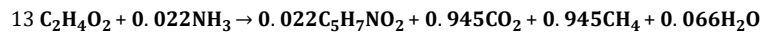
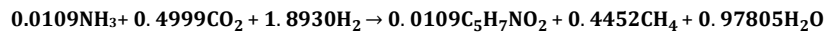
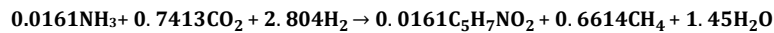
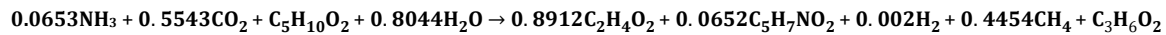
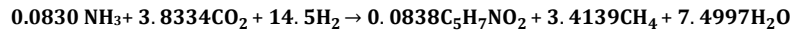
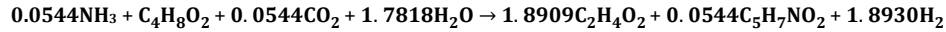
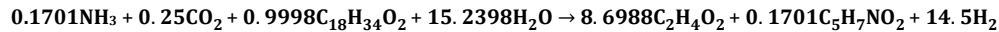
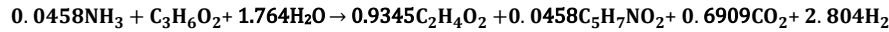
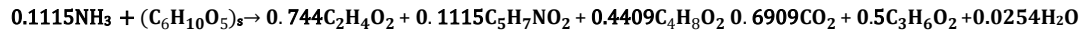
Se simuló el proceso de obtención de estruvita en el software SuperPro Designer. Se inició añadiendo un flujo de vinaza cruda que va hacia un tanque de almacenamiento, en este flujo se consideraron las propiedades características de la vinaza además de algunos compuestos consultado en la tesis de (Fortuny, 2022), los cuales son propios de la materia orgánica y son necesarios para llevar a cabo la simulación del digestor anaeróbico. Estos se muestran en la siguiente tabla

Tabla 8. Componentes ingresados en SuperPro Designer.

Componente	Peso modelcuar (g/mol)
Ácido acético	60.05
Ácido acrílico	72.06
Amoníaco	17.03
Argón	39.95
Biomasa	113.12
Ácido butírico	88.11
Dióxido de carbono	44.01
Carbohidratos	162.14
Carbohidratos inertes	162.14
Carbohidratos insolubles	162.14
Carbohidratos	162.14
Grasas	147.6
Glicerol	92.09
Sulfuro de hidrogeno	34.08
Hidrógeno	2.02
Hidrógeno propionato	2.02
Hidrógeno butirato	2.02
Metano	16.04
Nitrógeno	28.01
Ácido oleico	282.47
Oxígeno	32
Ácido propiónico	74.08
Proteínas inertes	27.89
Proteínas insolubles	27.89
Proteínas solubles	27.89
Proteínas	27.89
Dióxido de azufre	64.06
Trioleína	885.4

Posteriormente el flujo de salida del tanque se dirige hacia un digestor anaeróbico en donde se añadieron las siguientes reacciones para simular el proceso:





Una vez simulado el digester, se tienen dos salidas, la primera es la salida del gas generado que este puede ser aprovechado para su uso en la industria o venta como gas metano, sin embargo, en el proceso de obtención de gas metano por una digestión anaeróbica se obtienen otros gases lo que cual lo hacen impuro, por lo que si se quiere aprovechar el gas generado se tendría que pasar por filtros para maximizar su uso. Por otro lado, se obtiene el digesto o digestato, este se considera un subproducto del digester, sin embargo, tiene las características necesarias para usarse como fuente de amonio en la creación de estruvita, por lo que este flujo se direcciona al reactor donde ocurrirá el proceso de obtención de estruvita.

En este reactor se añade un flujo de MgO y se agita a velocidad alta, después se añade el flujo de H₃PO₄ y NaOH, y se agita a velocidad baja durante treinta minutos, después se deja ocurrir la reacción en el sedimentador.

Una vez obtenido el sedimento se separa y se lleva a filtración granular, la cual se pasa por un proceso de granulación que a su vez seca el producto. En este caso puede usarse también un secador rotatorio o un secador que requiera de poca energía para minimizar costos.

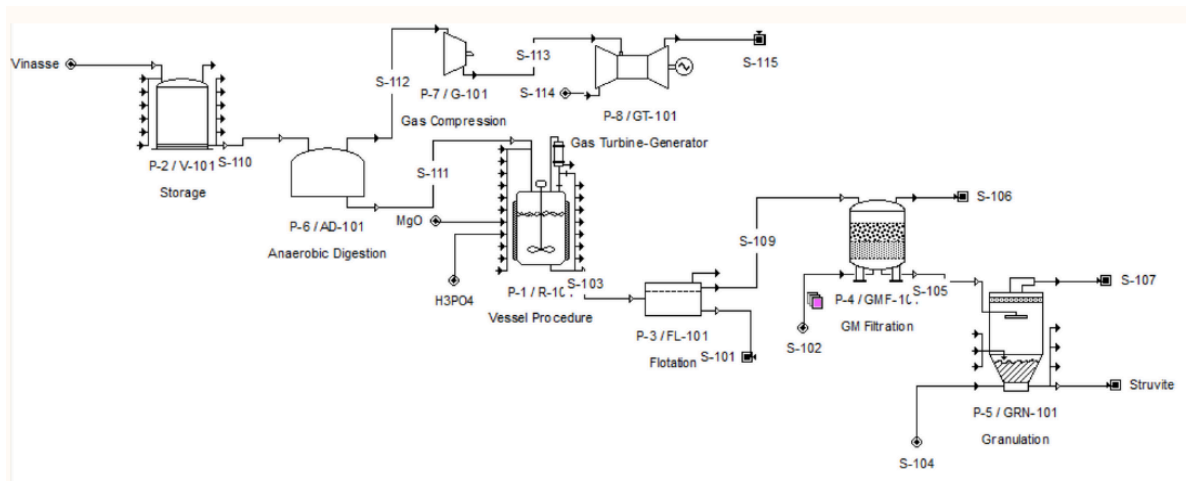


Imagen 18. Diagrama del proceso de producción de fertilizante químico.

Para poder analizar a profundidad la estructura de las muestras obtenidas de fertilizante se optó primeramente por observarlas con un estereoscopio. Esta técnica es comúnmente conocida como microscopía estereoscópica, la cual utiliza el principio de la estereoscopía para ofrecer una visión tridimensional de una muestra. Este tipo de microscopio, también conocido como microscopio de disección, es ampliamente utilizado en estudios de muestras que requieran manipulación precisa bajo magnificación, y en donde la percepción de la profundidad sea crucial. Es por esto, que se decidió analizar las muestras primeramente por este equipo. A continuación, se presentan algunas de las fotos obtenidas en este estudio.

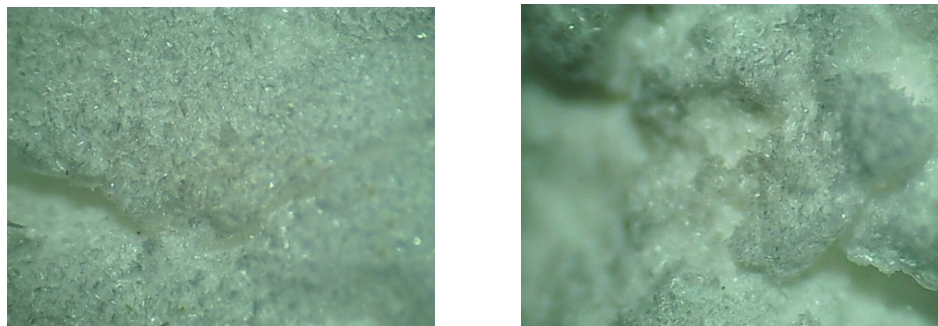


Imagen 19, 20. Fotografías del fertilizante químico compuesto por estruvita a partir de digesto.



Imagen 21, 22. Fotografías del fertilizante químico compuesto por estruvita a partir de vinaza cruda.

Así mismo, también se decidió analizar las muestras de fertilizante utilizando las técnicas SEM y EDS. Como se mencionó previamente, estas técnicas utilizan un haz de electrones en lugar de luz para formar una imagen de alta resolución de la superficie de una muestra, y también se permite identificar la composición elemental de la muestra analizada (Goldstein, 2018). Con este estudio se logró obtener un análisis morfológico y topográfico del mineral obtenido, se pudo determinar las fases y variaciones composicionales y finalmente se examinó la estructura interna del mineral. En las imágenes que se muestran a continuación, se puede observar dicho estudio.

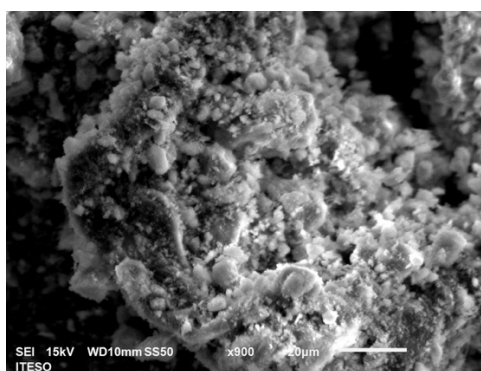


Imagen 23. Fotografía SEM del fertilizante químico compuesto de estruvita a partir de digesto.

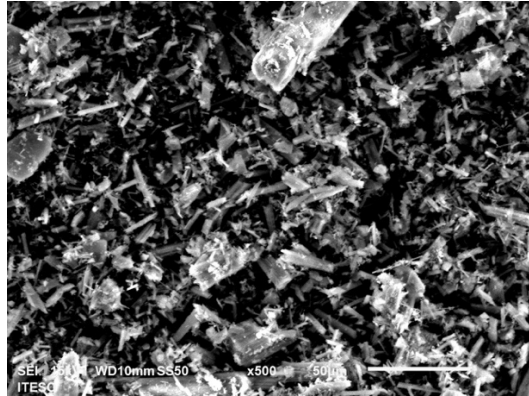


Imagen 23. Fotografía SEM del fertilizante químico compuesto de estruvita a partir de digesto².

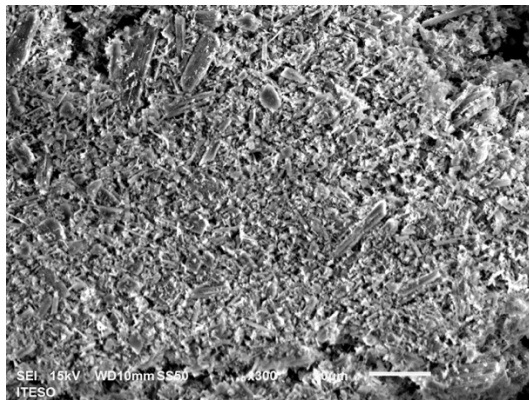


Imagen 24. Fotografía SEM del fertilizante químico compuesto de estruvita a partir de digesto³.

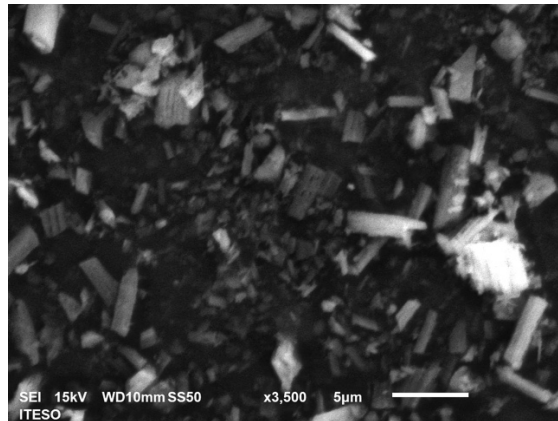


Imagen 25. Fotografía SEM del fertilizante químico compuesto de estruvita a partir de digesto escala x3500.

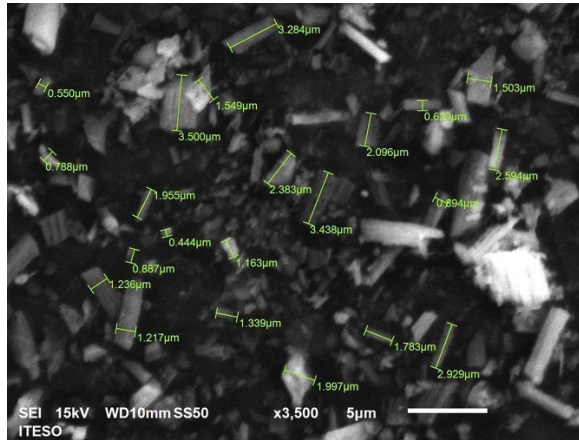
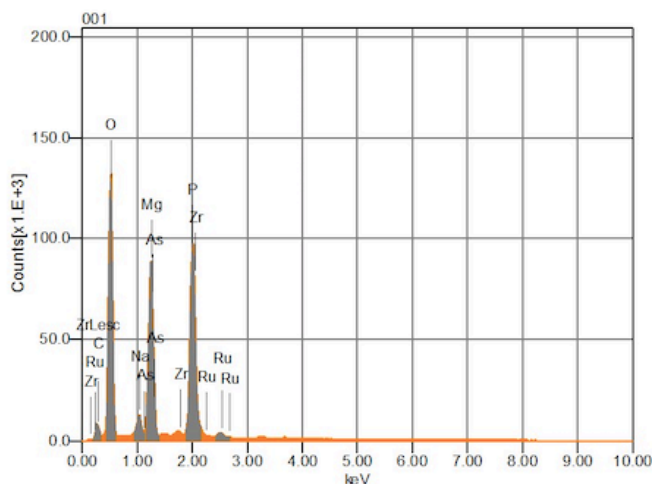


Imagen 26. Fotografía SEM del fertilizante químico compuesto de estruvita a partir de digesto medición de tamaño de partículas.

Sin embargo, cabe mencionar que el tamaño de las partículas de los cristales de estruvita puede variar significativamente dependiendo de varios factores durante el proceso de formación. Estos incluyen la concentración de iones en la solución, el pH, la temperatura, y la presencia de inhibidores o promotores de cristalización. El control del tamaño de los cristales de estruvita es importante en el tratamiento de aguas residuales, donde cristales más grandes son preferidos para facilitar la recolección y minimizar los problemas de manejo. En la agricultura, el tamaño de los cristales puede influir en la tasa de liberación de nutrientes cuando se usa estruvita como fertilizante (Fernández, 2015).

A continuación, en la siguiente imagen se presenta el análisis de EDS que se obtuvo de la muestra de fertilizante químico a partir de vinaza digerida por el método Kjeldahl.



Acquisition Condition
 Instrument : 6010LA
 Volt : 15.00 kV
 Current : ---
 Process Time : T2
 Live time : 60.00 sec.
 Real Time : 84.15 sec.
 DeadTime : 29.00 %
 Count Rate : 72248.00 CPS

Chemical formula	ms%	mol%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	11.68	19.11	0.19	181931	0.0666870	K
O	44.38	54.54	0.13	3203253	3.8480942	K
Na	1.81	1.55	0.11	325456	0.2504019	K
Mg	12.53	10.13	0.10	2739097	1.7044541	K
P	19.38	12.30	0.15	3719785	3.1986353	K
As	3.65	0.96	0.24	478331	0.6828384	L
Zr	5.70	1.23	0.42	717516	0.7909353	L
Ru	0.87	0.17	0.42	88088	0.1123757	L
Total	100.00	100.00				

JEOL EDS System

JEOL

Imagen 27. Gráfico EDS del fertilizante químico compuesto por estruvita a partir de digesto.

Es importante mencionar que únicamente se presenta el EDS obtenido de la muestra previamente mencionada debido a que se encontró que los resultados de esta estruvita fueron los óptimos y dignos de análisis. Sin embargo, esto justifica y confirma que la metodología final de la producción de fertilizante químico compuesto por estruvita debe de incluir un tratamiento ácido de la vinaza cruda (digestión ácida) para que el fertilizante tenga un índice de pureza más elevado.

Así mismo, es de suma importancia mencionar que la técnica de microscopía EDS enfrenta dificultades al intentar identificar elementos más ligeros como el N o el N-NH₃. Estos elementos presentan mayores desafíos de detección y medición a medida que el número atómico disminuye por debajo de 23 (vanadio). Este aumento en las dificultades se debe, en parte, a un fenómeno competitivo conocido como emisión Auger, el cual disminuye la intensidad de la fluorescencia. (*Adaptado de Skoog, et al., 2008*). En la tabla que se muestra a continuación se presenta el grado fertilizante de la estruvita experimental obtenida.

Tabla 8. Grado fertilizante estruvita experimental.

Parámetro	Estruvita experimental (%)
N	3
P	19.38
Mg	12.53

Ahora bien, una vez con los porcentajes en masa de la estruvita experimental se decidió comparar con estos valores con estruvitas de referencia.

Tabla 9. Composiciones estruvitas de referencia y estruvita experimental.

Parámetro	Estruvita pura (%) ¹	Estruvita referencia 1 (%) ²	Estruvita referencia 2 (%) ³	Estruvita experimental (%)
N	5.7	4.6	3.21	3
P	12.6	10.7	9.39	19.38
Mg	9.9	16.8	10.45	12.53

(Callejas Hernández, et al., 2013)¹, (Di Laconi, et al., 2009)², (Lucero Sobarzo, et al. 2017)³. *Porcentaje en masa.

Las composiciones de la estruvita experimental obtenida a partir de vinazas tequileras muestra resultados muy similares a los datos encontrados en otros estudios realizados. La concentración de nitrógeno junto a los análisis obtenidos con las microscopías SEM y EDS confirman que el precipitado obtenido si es estruvita.

Cuantificación del tratamiento de la vinaza:

Se decidió realizar un análisis en el tratamiento real de la vinaza utilizada en el tratamiento. En las tablas que se muestran a continuación se observa como la cantidad de nitrógeno amoniacal aumenta de manera significativa después de que la vinaza se somete al tratamiento ácido (**tabla 10**). Es por esto, que se decidió utilizar la estruvita obtenida con vinaza digerida para obtener los parámetros de producción.

Tabla 10. Tratamiento de la vinaza.

Resultados experimentales #Lote 1				
Parámetro	Método analítico	Unidad	Entrada (vinaza cruda)	Salida (sobrenadante)
Nitrógeno orgánico total (Kjeldahl)	NMX-AA-026-SCFI-2010	mg/L	572.24	6.206

Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	NMX-AA-026-SCFI-2010	mg/L	7.63	6.21
Nitratos (N)	NMX-AA-079-SCFI-2001	mg/L	<0.100	<0.100
Nitritos (N)	NMX-AA-099-SCFI-2006	mg/L	<0.0099	<0.0099
Fosfatos	NMX-AA-029-SCFI-2001	mg/L	31	17
pH en laboratorio	NMX-AA-008-SCFI-2016	NA	3.71	6
DQO	NMX-AA-030/1-SCFI-2012	mg/L	46,760.0	24,315.2

Tabla 11. Tratamiento de la vinaza digerida.

Resultados experimentales vinaza digerida				
Parámetro	Método analítico	Unidad	Entrada (vinaza digerida)	Salida (sobrenadante)
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	NMX-AA-026-SCFI-2010	mg/L	423.78	6.21
pH en laboratorio	NMX-AA-008-SCFI-2016	NA	1	6

Para el desecho de líquidos residuales en el suelo en México, la normativa relevante es la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Esta norma establece los límites máximos tolerables de contaminantes en las aguas residuales que se descargan en cuerpos de agua nacionales, esta norma se concentra principalmente en los límites de contaminantes para proteger cuerpos acuáticos, pero proporciona un marco relevante para considerar los impactos ambientales del desecho de líquidos (NOM, 2016).

Esta norma define que un residuo es considerado peligroso por corrosividad, cuando es capaz de corroer el acero al carbono (SAE 1020) a una velocidad de 6,35 milímetros o más por año, o bien sí presenta un pH menor o igual a 2 o mayor o igual a 12.5. Sin embargo, un pH de 3.7 también tiene el mismo efecto perjudicial en el suelo, ya que este contribuye a la acidificación del suelo. Por lo tanto, al realizar la metodología de la producción de fertilizante el pH aumento a un valor de 6, y este parámetro ya se considera dentro de los aceptados por la NOM.

Así mismo, la demanda química de oxígeno (DQO) disminuyó aproximadamente un 52% después de realizar el tratamiento de la digestión ácida siguiendo el método Kjeldahl. Aún se debe de cuantificar los valores finales del DQO posterior a la metodología de cristalización de estruvita, sin embargo, estudios encontrados en la literatura indican que este parámetro si se reduce al someter la vinaza a el proceso de cristalización (Corona, 2022).

Parámetros de producción:

Se decidieron obtener los parámetros de producción de la estruvita comparándolos y analizándolos con un cultivo de maíz, ya que el estado de Jalisco es uno de principales productores de maíz en México, y este cultivo juega un papel crucial en la economía agrícola del estado. El maíz es adaptable a diferentes terrenos y condiciones, lo que lo hace especialmente adecuado para las áreas agrícolas de Jalisco (Castañeda, 2014).

Tabla 12. Producción de estruvita por un litro de vinaza.

Producción estruvita		
Cantidad	Unidad	Muestra
1	L	vinaza
0.37	kg	estruvita

Tabla 13. Producción de estruvita por un litro de tequila.

Producción estruvita		
Cantidad	Unidad	Muestra
1	L	tequila
9	L	vinaza
3.37	kg	estruvita

Tabla 14. Para fertilizar 1 hectárea de maíz.

Para 1 hectárea de maíz		
Cantidad	Unidad	Muestra
309.598	kg/ha	fertilizante
0.341	ton/ha	
826.670	L	vinaza

En la **tabla 11**, se puede observar que por cada litro de vinaza que sea tratada se obtienen 0.37 kg de estruvita, sin embargo, para calcular los kilos obtenidos por 1 L de tequila se considero un promedio de 9 L de vinaza producida. Obteniendo 3.37 kg de estruvita por cada litro de tequila producido (**tabla 12**).

Para satisfacer la cantidad requerida de fertilizante de 1 hectárea de maíz se obtuvo que se necesitan 309.60 kg de estruvita (**tabla 13**). Ahora bien, tomando en cuenta la producción anual de 651 millones de litros de tequila, se obtendrían aproximadamente 2.4 millones de toneladas de estruvita. Esa cantidad sería capaz de fertilizar a 7 millones de hectareas de maíz.

Tabla 15. Producción anual estruvita.

Producción anual estruvita		
Cantidad	Unidad	Muestra
651,000,000	L	tequila
5,859,000,000	L	vinaza
2,194,262,370.72	kg	estruvita
2,418,759.54	ton	
7,087,473.85	ha	maíz

Costos

Se realizó un análisis de costos en donde se consideraron solamente el costo de los reactivos, para esto se consideró el óxido de magnesio (MgO) al 98% grado industrial, el cual es la manera más típica de encontrar este reactivo en el mercado y fue el grado que utilizamos en nuestra metodología, mismo caso con el ácido fosfórico H₃PO₄ y NaOH al 85% y 50% grado industrial respectivamente.

En base a las dosis utilizadas en nuestra metodología final se calculó cuanto costaba producir un kg estruvita y cuanto sería el costo por m³ de vinaza, obteniendo que por cada kg de estruvita se necesitan 0.06 \$USD que son alrededor de 1 \$MXN con respecto a la conversión actual (1 dólar estadounidense es = 16.81\$MXN). Por su parte tratar 1m³ de vinaza costaría 23.39 \$USD que equivalen a 393.14 \$MXN, enfatizando que por cada m³ se obtiene 374 kg de estruvita.

Tabla 16. Costos de reactivos para estruvita.

Reactivo	Precio en USD		
	\$/kg	\$/kg de estruvita	\$/m3 de vinaza
MgO al 98% grado industrial	0.65	0.012135632	4.544932846
H3PO4 al 85% grado industrial	0.86	0.016250004	6.085812007
NaOH al 50% grado industrial	0.29	0.034071058	12.76
Total		0.062456694	23.39074485

1.7. Bibliografía y otros recursos

- Arias, S. C., Pérez, J. C., & Rueda, O. M. (2004). Lixiviación de nitratos en dos suelos al alterar sus propiedades físicas. *Revista EIA*, (2), 35-40
- Ayres, A. S., & Hagihara, H. H. (1961). Effectiveness of raw rock phosphate for sugar cane. *Soil Science*, 91(6), 383-387.
- Bautista-Justo, M., García-Oropeza, L., Corona, J. B., & Parra-Negrete, L. A. (2001). El Agave tequilana Weber y la producción de tequila. *Acta Universitaria*, 11(2), 26-34.
- Carril, E. P. U. (2011). Fotosíntesis: aspectos básicos. *Reduca (Biología)*, 2(3).
- CEEP (Comité Europeen d'Etudes des Polyphosphates). (2001). *Conference Summary, Second International Conference on the recovery of phosphorus from sewage and animal wastes Noordwijkerhout*, The Netherlands 12 & 13 March 2001.
- Chaplin, M. (2014). Enzyme Technology: Effect of pH and ionic strength. *ISBU*. Recuperado de <https://water.lsbu.ac.uk/water/enztech/ph.html>
- CHEM1102. (2004). *Scilearn Sidney*. Recuperado de <https://scilearn.sydney.edu.au/firstyear/exams/chem1102/2004answers/2004-J-6.pdf>
- Colin, V. L., Cortes, A. A., Aparicio, Amoroso, J., J. D., M. J. (2016). Potential application of a bioemulsifier-producing action bacterium for treatment of vinasse. *Chemosphere*. 144, pp. 842- 847.
- Corona, F., Hidalgo, D., Martín-Marroquín, J.M. *et al.* Study of the Crystallization Reaction Behaviour to Obtain Struvite. *Waste Biomass Valor* **13**, 3767–3786 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01797-8>

Fernández, J. M. (2015). Procedimiento y sistema de cristalización de estruvita para la recuperación de fosfatos en aguas residuales. *Google Patents*. Recuperado de <https://patents.google.com/patent/WO2015128528A1/es>

Goldstein, J. I. (2018). Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. *Springer*: Fourth Edition [PDF]. Recuperado por https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=D0I_DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=microscopia+SEM+y+EDS&ots=37LJ5pCIng&sig=oCBu_Zii8f3VhQoLTIPr0oZ4tdk#v=onepage&q&f=false

González-Morales, Carolina, Belén Fernández, Francisco J. Molina, Darío Naranjo-Fernández, Adriana Matamoros-Veloza, and Miller Alonso Camargo-Valero. 2021. "Influence of pH and Temperature on Struvite Purity and Recovery from Anaerobic Digestate" *Sustainability* 13, no. 19: 10730. <https://doi.org/10.3390/su131910730>

Hach. (2024). Amoníaco y amonio. Recuperado de <https://es.hach.com/parameters/ammonia>

Herrera, A. (2022). DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA REDUCIR LOS COSTOS DE INVERSIÓN DEDICADOS AL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE VINAZAS TEQUILERAS.

HOPKINS, W. G. 1995. Introduction to Plant Physiology. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 464 p.

IÑIGUEZ, Gilberto, & HERNÁNDEZ, Rosaura. (2010). Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM). *Revista internacional de contaminación ambiental*, 26(4), 299-311. Recuperado en 10 de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000400005&lng=es&tlng=es.

JONES, J.B. 1998. Plant Nutrition Manual. CRS Press. LLC. Boca Raton, USA. 149 p.

Ledesma, C., Bonansea, M., Rodríguez, C. & Sánchez, A., 2013. Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Cordoba (Argentina). *Revista Ciência Agronômica*, 44(3), pp. 419-425.

Lucero Sobarzo, D. (2017). *Análisis de la remoción de nitrógeno en lixiviados de residuos sólidos urbanos, como alternativa para la disminución de la contaminación de agua en la Cuenca Santiago-Guadalajara, México.*

MANDAL, S.C.: Phosphorus management of our soils. Need for a more rational approach. 40th Sess. Indian Soc. of Soil Sci., Bhubaneswar (1975).

MCINTYRE, G.I. 1997. The role of nitrate in the osmotic and nutritional control of plant development. *Australian Journal of Plant Physiology* 68: 107-112.

Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). *Principios de nutrición vegetal.*

Navarro García, G. (2023). *Fertilizantes. Química y acción.* Ediciones Mundi-Prensa.

Omidire, N. (2019). *Struvite: Definition, Benefits, and Potential Application in Arkansas Agriculture.* University of Arkansas City: Division of Agriculture, Research & Extension. Recuperado de <https://www.uaex.uada.edu/publications/pdf/FSA9542.pdf>

Peñañiel, R. D., Moreno, C., & de Lourdes Ochoa-Herrera, V. (2016). Eliminación de nitrógeno y contaminación orgánica de agua residual industrial pretratada en lagunas anaeróbicas mediante un biofiltro de arena. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 8(1).

Penedo, M. (2008). *PIRÓLISIS DE BAGAZO DE CAÑA A ESCALA DE LABORATORIO. PARTE I: INFLUENCIA DE CONDICIONES DE OPERACIÓN EN EL RENDIMIENTO DE PRODUCTOS*. Universidad de Oriente. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543756008.pdf>

Quevedo, J. (1901). *Manual de abonos químicos para el uso de los labradores de la provincia de Segovia*. Diputación Provincial de Segovia.

Rodríguez, A. (2019, marzo). *TRATAMIENTO DE VINAZA DE TEQUILA POR MEDIO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN y FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA EMPLEANDO NANOPARTÍCULAS DE TIO₂*. Universidad de Guadalajara. Recuperado de http://www.docfm.cuvalles.udg.mx/sites/default/files/m._en_c._alicia_rodriguez_arreola.pdf

Rodríguez, Y. J. (2021). Electrocoagulación como alternativa de tratamiento de aguas residuales mixtas originadas en la industria del procesamiento de lácteos y cárnicos. *Scielo*. Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2021000100026#:~:text=La%20electrocoagulaci%C3%B3n%20\(EC\)%20se%20ha,la%20reutilizaci%C3%B3n%20de%20estas%20aguas.](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2021000100026#:~:text=La%20electrocoagulaci%C3%B3n%20(EC)%20se%20ha,la%20reutilizaci%C3%B3n%20de%20estas%20aguas.)

Schneiter, R. W., Middlebrooks, E. J., & Sletten, R. S. (1982). Lime stabilization and land disposal of cold region wastewater lagoon sludge. *Environment International*, 7(3), 207-213.

Sela, G. (2024). *Los nutrientes de las plantas*. Recuperado de <https://croipaia.com/es/blog/nutrientes-de-plantas/>.

Ulex, G.L. (1845) Svenska Vetenskapsakademien, Stockholm, Handlingar [Ak. Stockholm, Öfv.]: 3: 32 (as Struveit).

Vaidovits Navarro, A. A. *Modelo cinético de la fermentación del jugo de agave tequiliana weber variedad azul.*

WALTER, B., BATGEN, D., PATENBURG, H. and KOCH, W.: (G) *Effect of gas and salt on soil and plant. Das Gartenamt 10, 578-581 (1974).*

Walter, D. (2016). Caraterización de lodos como inoculantes para un reactor anaeróbico para el tratamiento de vinaza. Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30182016000200003

2. Productos

Nombre y código del PAP (como en la carátula):	4D09 – Innovación y Emprendimientos Biotecnológicos
Nombre del sub proyecto (como en la carátula):	Producción de Fertilizante Químico a partir del Tratamiento de Vinazas Tequileras
Nombre del producto:	Fertilizante químico compuesto por estruvita
Descripción (qué es, para	La estruvita es mineral rico en fosfato de magnesio y amonio hexahidratado. Su formula quimica es: $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$, este mineral se encuentra de forma natural en sistemas geoquímicos, tiene una baja

<p>quién se realizó y para qué es):</p>	<p>solubilidad (0.2 g L⁻¹ en agua) y contiene 5,7% de nitrógeno (N), 12,6% de fósforo (P) y 16.40% de magnesio (Mg) (<i>Fernández, 2015</i>).</p> <p>La estruvita es considerada una fuente alternativa para la sustitución de fertilizantes químicos, esto gracias a su contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y magnesio (Mg) previamente mencionado. Además, la estruvita es un fertilizante de liberación lenta, lo que significa que los nutrientes se liberan gradualmente a lo largo del tiempo, lo cual reduce el riesgo de lixiviación, contaminación del suelo y aguas subterráneas (<i>Fernández, 2015</i>). Sin embargo, en la realización de este proyecto se obtuvo fertilizante químico compuesto de estruvita a partir de vinazas tequileras previamente tratadas en una digestión ácida.</p>
<p>Autores:</p>	<p>Ing. En Química. Jesús Alejandro Núñez Alatorre. Ing. En Química. Ilia Otal Chang.</p>

A continuación, se presenta un prototipo del fertilizante químico obtenido:



Imagen 28. Fertilizante químico compuesto por estruvita a partir de digesto.

3. Reflexión crítica y ética de la experiencia

El RPAP tiene también como propósito documentar la reflexión sobre los aprendizajes en sus múltiples dimensiones, las implicaciones éticas y los aportes sociales del proyecto para compartir una comprensión crítica y amplia de las problemáticas en las que se intervino.

3.1 Sensibilización ante las realidades

Ilia Otal Chang:

A lo largo del desarrollo del proyecto sobre el uso de vinazas tequileras para la creación de un fertilizante químico a base de estruvita, he tenido varias oportunidades para reflexionar sobre las implicaciones éticas y sociales de nuestro trabajo. Al considerar el impacto ambiental del desecho de las vinazas, y su transformación en un recurso valioso, he podido apreciar de manera más profunda cómo la ciencia y la tecnología pueden y deben integrarse en conjunto para el cuidado del medio ambiente.

Así mismo, al trabajar con las vinazas tequileras, un subproducto de una de las industrias más emblemáticas de México, me posicioné frente a una realidad donde la sustentabilidad puede ir de la mano con la tradición. Pude analizar de primera mano como las prácticas industriales impactan tanto en el medio ambiente como en las comunidades locales que dependen de la agricultura y la producción de tequila para subsistir. Esto me llevó a valorar más las prácticas de producción responsable y el potencial de la innovación para mejorar la calidad de vida de las personas en estas comunidades.

Por otro lado, el contacto directo con los aspectos prácticos del manejo de residuos y su reutilización no solo fue un reto técnico, sino también una experiencia satisfactoria. Sentí un sentimiento enriquecedor al saber que nuestro trabajo contribuye directamente a reducir la contaminación, ofrecer alternativas sustentables para la gestión de residuos y la creación de un fertilizante sustentable. La posibilidad de cambiar paradigmas industriales y fomentar una cultura de respeto al medio ambiente generó en mí un sentido de propósito y motivación.

Al reflexionar sobre cómo mi sentir y actuar en este proyecto se alinean con mis creencias y razonamientos, me doy cuenta de que ambos aspectos están profundamente relacionados. Mis creencias sobre la importancia de cuidar el medio ambiente se fortalecieron con los razonamientos técnicos y científicos que aprendí durante el proyecto. Esto reafirmó mi compromiso profesional y personal con la sostenibilidad y la ética ambiental.

Este proyecto me permitió analizar el ejercicio de mi profesión en el contexto actual de desafíos ambientales significativos. La producción de un fertilizante que aprovecha un residuo industrial y al mismo tiempo contribuye a la nutrición del suelo, es un claro ejemplo de cómo la ingeniería química puede tener un impacto social positivo. Desde la perspectiva ética, el proyecto reiteró la necesidad de desarrollar tecnologías que no solo sean eficaces sino también responsables con el entorno y las comunidades.

El compromiso con la ética en la ingeniería química implica no solo cumplir con los estándares técnicos, sino también contribuir activamente a la creación de un futuro más sostenible. La experiencia de este proyecto ha reforzado mi convicción de que los ingenieros tienen un papel crucial en la construcción de ese futuro.

Jesús Alejandro Núñez Alatorre

Iniciamos el proyecto solo con algunas ideas, pero nada definido aún, nos pidieron investigar más a fondo y consultar patentes para recabar más información. Conforme a las sesiones del PAP y por medio de nuestros asesores nos han recomendado enfocarnos en el nitrógeno presente de las vinazas para que sea la fuente principal de nuestro fertilizante, ya que este nutriente se encuentra en gran cantidad en la vinaza.

Tuve la oportunidad de hablar con el señor Jesús Valdivia, dueño de la tequilera "La Purísima" el cual a su vez nos brindó vinaza para este proyecto, en donde me comentó que él ha tratado durante varios años en encontrar una solución de tratamiento de vinazas ya que él tiene una filosofía muy particular que también la comparto, y es que su principio es que si el la madre naturaleza nos brinda todos estos recursos, no podemos pagarle de una manera en que afecte a la madre naturaleza ya que esto es un ciclo que debería ser reciproco. Sin embargo, la mayoría de los tequileros solo les interesa el factor económico y casi nadie se pone a pensar en el factor ambiental ni social.

Por otro lado, después de una extensa investigación, nos dimos cuenta de que no podemos utilizar el nitrógeno directamente de las vinazas ya que este se encuentra en forma proteica,

lo que dificulta su uso y que las plantas asimilan el nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) y nitratos, por lo que nuestro principal objetivo por el momento es encontrar una forma de convertir el nitrógeno presente en las vinazas para poder usarse en la formulación del fertilizante.

Encontramos que una manera de convertir el nitrógeno de una fuente orgánica a una forma amoniacal es por medio de una digestión anaeróbica, sin embargo, esta puede ser muy tardada. No obstante, con base a las metodologías utilizadas en la caracterización de la vinaza encontramos que la digestión Kjeldahl puede ser una buena alternativa para convertir el nitrógeno a una forma asimilable en la creación de fertilizantes.

Nuestra metodología final fue la cristalización de la estruvita, en donde con esta metodología se obtendrá un fertilizante NP + Mg, en donde a su vez será de liberación lenta, lo que reduce el riesgo de lixiviaciones que son causados por el uso de fertilizantes de corta o rápida liberación.

Al final obtuvimos los resultados esperados del PAP en donde además de crear un fertilizante químico ayudaremos a disminuir o mitigar la contaminación ejercida por las vinazas tequileras en el estado, ya que esto cada vez es un problema más grande que no se le da la suficiente importancia. Por lo cual, este proyecto me enseñó que muchas veces las personas se vuelven indiferentes antes los problemas que causan con tal de generar dinero, sin embargo, aun existimos personas que aún nos interesa el enfoque social y ambiental y a pesar de seamos menos podemos hacer grandes cosas y lograr cambios.

3.2 Aprendizajes logrados

Ilia Otal Chang:

Durante el desarrollo del Proyecto de Aplicación Profesional (PAP) en el que trabajamos en la producción de fertilizante químico compuesto por estruvita a partir de la transformación

de vinazas tequileras, tuve la oportunidad de desarrollar y fortalecer diversas competencias en ámbitos disciplinares, sociales y universitarios.

En el ámbito disciplinar, yo considero que mi mayor desafío fue integrar los conocimientos de química y procesos industriales para diseñar un método eficiente y sostenible de tratamiento de las vinazas. La necesidad de encontrar las proporciones molares de los reactivos, asegurando que el producto final fuera de alta calidad, puso a prueba mi capacidad de aplicar teorías en situaciones prácticas reales. Este desafío se presentó especialmente durante las etapas iniciales del diseño, donde tuve que ajustar múltiples veces los parámetros del proceso basándome en los resultados experimentales. Responder a este reto requirió de una investigación profunda y colaboración constante con mi compañero de equipo, lo que finalmente me ayudó a mejorar mis habilidades en ingeniería química aplicada.

En el plano social, el proyecto me permitió interactuar con diversos grupos de interés, incluyendo agricultores locales, compañero de equipo y profesionales del sector tequilero o expertos en el tema. El reto aquí fue comprender y valorar las diferentes perspectivas y necesidades de cada grupo, adaptando nuestra comunicación y estrategias de colaboración para asegurar la aceptación y eficacia del proyecto. Un momento particularmente desafiante fue presentar nuestro proyecto a las tequileras para que nos proporcionaran vinazas. Sin embargo, esto me permitió desarrollar habilidades de empatía y persuasión, logrando eventualmente ganarme su confianza y colaboración.

Universitariamente, este proyecto reforzó mi capacidad de autogestión y trabajo en equipo. Coordinar actividades, cumplir con plazos y manejar recursos limitados fueron habilidades esenciales que tuve que mejorar para contribuir efectivamente al equipo y alcanzar nuestros objetivos a tiempo. La gestión del tiempo y la resolución de conflictos fueron competencias críticas, especialmente durante las etapas de prueba y error del desarrollo del fertilizante.

Profesionalmente, el proyecto me enseñó la importancia de la innovación sostenible en la industria química y reforzó mi interés en las tecnologías verdes. Socialmente, aprendí sobre el impacto significativo que las decisiones técnicas pueden tener en las comunidades locales

y la importancia de integrar sus voces en el proceso de innovación. Personalmente, este proyecto fortaleció mi confianza en mi capacidad para enfrentar y superar desafíos complejos, y me motivó a seguir buscando soluciones que beneficien tanto al medio ambiente como a la sociedad.

Jesús Alejandro Núñez Alatorre

Al concluir el proyecto y presentar nuestro fertilizante químico, me siento satisfecho con el trabajo realizado, pero también consciente de las implicaciones éticas que conlleva. Como profesionales, debemos estar siempre atentos a cómo nuestras acciones impactan en la sociedad y el medio ambiente, y trabajar para minimizar cualquier efecto negativo. En este caso particular, me alegra haber podido contribuir a la creación de un producto que puede mejorar la productividad agrícola de manera sostenible.

Sin embargo, es importante reconocer que este logro no ha sido sin desafíos éticos y prácticos. La utilización de vinazas tequileras como fuente de nutrientes plantea interrogantes sobre el manejo adecuado de estos subproductos y los posibles impactos ambientales y sociales asociados. Es esencial asegurar que la extracción y aplicación de las vinazas se realice de manera responsable y respetuosa con el medio ambiente y las comunidades locales.

Creo firmemente que nuestro producto puede tener un impacto positivo en las comunidades rurales del estado al proporcionar una alternativa sostenible para mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la producción agrícola. Sin embargo, también reconozco la importancia de seguir evaluando y mejorando nuestros procesos para garantizar que cumplan con los más altos estándares éticos y ambientales. En última instancia, nuestro objetivo debe ser encontrar un equilibrio entre la innovación científica y el respeto por el medio ambiente y las comunidades que dependen de él.