

**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS “CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ”  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



**UNIVERSIDAD  
DE CIENFUEGOS**  
CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

Propuesta tecnológica para producir fertilizantes líquidos NPK  
(Nitrógeno, Fósforo y Potasio) en la “ Empresa Química de  
Cienfuegos”.

Autor. Daniela González Suárez

Tutor. MSc. Claudia Aguila Prado

Ing. Laritza Martínez Pérez

“Año 62 de la Revolución”

Cienfuegos, 2020

# *PENSAMIENTO*

*No podemos resolver problemas  
pensando de la misma manera que  
cuando los creamos.*

*Albert Einstein*

# DEDICATORIA

*A mi Mamá, por ser la persona más importante en mi vida, por todo su esfuerzo, sacrificio, comprensión, apoyo, por siempre estar a mi lado cuando la necesito y cuando no también, por ser la fuerza que me inspira a lograr grandes metas.*

*A mi tito, mi viejito, la otra persona importante, que siempre está y estará ahí para mí, que me consiente y me cuida más que nadie.*

*A mi abuelo, mi papi, ojalá estuviera aquí para verme, pero, aunque no está conmigo, sé que desde donde me vea está muy feliz de ver a su nieta ingeniera, ya que eso fue lo que siempre quiso.*

*A mi tío querido, para el que siempre fui su niñita linda y chiquita, ojalá estuviera aquí para verme, que, aunque no entendiera nada de lo que trata esta tesis, estaría muy feliz y orgulloso.*

*A mi tati, mi amor, mi esposo, por estar siempre conmigo, acompañándome, apoyándome y cuidándome, por caminar siempre a mi lado y por ser la persona con la que quiero estar siempre. Te amo.*

# AGRADECIMIENTOS

*A mi mamá por apoyarme, por su amor y dedicación incondicional, por sacrificarse tanto por mí, y por todo su esfuerzo y sacrificio a lo largo de toda mi vida.*

*A mi tito, por hacer y darnos todo lo que necesitamos, por todo su esfuerzo y sacrificio para con nosotras y por ser la persona increíble que es.*

*A mi esposo, mi tati, por toda su paciencia, dedicación y entrega, por estar siempre conmigo en todo momento, por su apoyo en los momentos más difíciles y por ser el mejor esposo.*

*A mi profesora y tutora MSc. Claudia Aguila Prado, por su ayuda y dedicación, por su ayuda incondicional y dedicación para lograr mi meta de ser ingeniera.*

*A mi colaborador y al final oponente, MSc. Juan F. Agras Valdivia, por toda su ayuda y consejos, tanto para mi vida como estudiante como para mi futura vida como profesional.*

*A mis compañeros, tanto los que están conmigo en esta graduación como los que se graduarán después.*

*A todos, MUCHAS GRACIAS.*

# RESUMEN

En la actualidad, las tecnologías para producir fertilizantes líquidos, han tenido un aumento creciente, fomentado fundamentalmente, porque son más fáciles de transportar, almacenar y distribuir en el campo, y además por la creciente demanda de producir alimentos para satisfacer las necesidades de la población. El presente trabajo titulado ‘‘Propuesta tecnológica para producir fertilizantes líquidos NPK (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) en la Empresa Química de Cienfuegos’’, tiene como objetivo principal proponer una tecnología de producción de fertilizantes líquidos NPK en la Empresa Química de Cienfuegos que diversifique sus producciones y aumente su valor agregado. Se realizó una revisión bibliográfica que concluyó con la aplicación de la metodología propuesta por Ing. Yoel Alberto Calderón Rosendi para seleccionar la tecnología para producir fertilizantes líquidos, se realizaron los balances de masa y energía del proceso, así como la selección de los equipos tecnológicos. Se determinó que un sistema de mezclado en frío es adecuado para el proceso tecnológico que se propuso y que la producción estimada anualmente de fertilizantes líquidos NPK con la tecnología seleccionada será de 1 127 m<sup>3</sup>. La misma cuenta con dos mezcladores con agitador mecánico incluido, de 1,5 m<sup>3</sup> de capacidad y un filtro al vacío del tipo Nutsche, cuyo volumen total de trabajo es de 2,0 m<sup>3</sup>.

**Palabras clave:** fertilizantes, líquido, nitrógeno, fósforo, potasio, tecnología y equipos.

# *ABSTRACT*

At the present time, the technologies to produce liquid fertilizers, they have had a growing increase, fomented fundamentally, because they are easier of transporting, to store and to distribute in the field, and also for the growing demand of producing foods to satisfy the population's necessities. The present titled work technological 'Propuesta to produce liquid fertilizers NPK (Nitrogen, Match and Potassium) in the Chemical Company of Cienfuegos', he/she has as main objective to propose a technology of production of liquid fertilizers NPK in the Chemical Company of Cienfuegos that diversifies their productions and increase their added value. He/she was carried out a bibliographical revision that concluded with the application of the methodology proposed by Engineer Yoel Alberto Calderón Rosendi to select the technology to produce liquid fertilizers, they were carried out the balances of mass and energy of the process, as well as the selection of the technological teams. It was determined that a system of having mixed in cold is adapted for the technological process that intended and that the dear production annually of liquid fertilizers NPK with the selected technology will be of 1 127 m<sup>3</sup>. The same bill with two mixers with included mechanical agitator, of 1,5 m<sup>3</sup> of capacity and a filter to the hole of the type Nutsche whose total volume of work is of 2,0 m<sup>3</sup>.

Key word: fertilizers, liquid, nitrogen, match, potassium, technology and teams.

# ÍNDICE

<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	1
<b>CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTES LÍQUIDOS NPK.</b> .....	5
1.1. Origen y desarrollo de los fertilizantes. ....	5
1.2. Consumo de los fertilizantes en el mundo. ....	7
1.3. Industria de los fertilizantes en Cuba. ....	9
1.4. Clasificación de los fertilizantes. ....	10
1.4.1. Composición de los fertilizantes. ....	12
1.4.2. Propiedades químicas de los fertilizantes. ....	12
1.5. Los fertilizantes NPK. ....	13
1.5.1. Nitrógeno.....	13
1.5.2. Fósforo.....	14
1.5.3. Potasio. ....	16
1.6. Los fertilizantes líquidos. ....	17
1.6.1. Origen y desarrollo de los fertilizantes líquidos.....	17
1.6.2. Consumo mundial de los fertilizantes líquidos.....	19
1.6.3. Clasificación de los fertilizantes líquidos.....	19
1.6.4. Propiedades de los fertilizantes líquidos. ....	20
1.6.5. Métodos de obtención de los fertilizantes líquidos. ....	22
1.6.6. Fuentes de Materias Primas.....	23
1.7. Ventajas y desventajas en la utilización de fertilizantes líquidos. ....	25
1.8. Los fertilizantes líquidos y el fertirriego. ....	27
1.9. Riesgos derivados del uso de los fertilizantes químicos.....	27
1.9.1. Impactos ambientales potenciales en la industria de los fertilizantes.....	28
<b>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA UTILIZADA PARA ELABORAR LA PROPUESTA DE TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTES LÍQUIDOS NPK EN LA EMPRESA QUÍMICA DE CIENFUEGOS (EQUIFA).</b> .....	31
2.1. Caracterización de la Empresa Química de Cienfuegos (EQUIFA).....	31
2.1.1. Estrategia empresarial de la empresa. ....	31
2.2. Método utilizado. ....	32
2.3. Descripción del proceso de producción de fertilizantes granulados NPK en la Empresa Química de Cienfuegos (EQUIFA).....	32

<b>2.4. Descripción del proceso tecnológico para la producción de fertilizantes NPK líquidos.</b>	34
2.4.1. Materias primas empleadas en el proceso.	35
2.4.2 Descripción de las principales etapas del proceso tecnológico.	36
2.4.3 Nivel de operación estimado.	37
<b>2.5. Desarrollo de los Balances de Masa y Energía.</b>	37
2.5.1. Balance en la etapa de Mezclado.	38
2.5.1.1 Balance de Energía	40
2.5.2. Balance en la etapa de Filtración.	40
<b>2.6. Sistemas de bombeo de la instalación.</b>	41
2.6.1 Sistema A. Sistema de bombeo de los mezcladores hacia los filtros.	41
2.6.2. Sistema B. Sistema de bombeo del filtro al vacío hacia los tanques de almacenamiento.	45
<b>2.7. Dimensionamiento de los equipos tecnológicos.</b>	46
2.7.1. Etapa de mezclado.	46
2.7.1.1. Dimensionamiento del agitador.	47
2.7.1.2. Selección de las resistencias eléctricas para el calentamiento del agua.	48
2.7.2. Dimensionamiento del filtro al vacío.	49
2.7.2.1. Dimensionamiento de la sección de filtrado (sección #2).	51
2.7.2.2. Dimensionamiento de la sección de suspensión (sección #1).	51
2.7.2.3. Dimensionamiento del sistema al vacío.	52
2.7.2.3.1. Sección de suspensión.	52
2.7.2.3.2 Sección de filtrado.	52
<b>CAPÍTULO III. PRESENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.</b>	53
3.1. Aplicación de la tecnología.	53
3.1.1. Resultado de los niveles de operación estimado.	53
3.2. Resultado del balance de masa y energía.	54
3.2.1. Resultado del balance de masa en la etapa de Mezclado.	55
3.2.2. Resultado del balance de Energía.	56
3.2.3. Resultado del balance de masa en la etapa de Filtración.	56
3.3. Propuesta de los sistemas de bombeo de la instalación.	56
3.3.1. Propuesta del Sistema A. Sistema de bombeo de los mezcladores hacia los filtros.	56

3.3.2. Propuesta del Sistema B. Sistema de bombeo del filtro al vacío hacia los tanques de almacenamiento. ....	59
3.4. Resultado del dimensionamiento de los equipos tecnológicos.....	61
3.4.1. Resultado del dimensionamiento del mezclador. ....	61
3.4.1.1. Resultado del dimensionamiento del agitador. ....	63
3.4.2. Propuesta de las resistencias eléctricas para el calentamiento del agua. ....	63
3.4.3. Resultado del dimensionamiento del filtro. ....	64
3.4.3.1. Resultados del dimensionamiento de la sección de filtrado (sección #2). ....	65
3.4.3.2. Dimensionamiento de la sección de suspensión (sección #1). ....	66
3.4.3.3. Resultados del dimensionamiento del sistema al vacío. ....	67
3.4.3.3.1 Resultado del dimensionamiento de la sección de suspensión. ....	67
3.4.3.3.2. Resultado del dimensionamiento de la sección de filtrado.....	67
<i>CONCLUSIONES</i> .....	69
<i>RECOMENDACIONES</i> .....	70
<i>BIBLIOGRAFÍA</i> .....	71
<i>ANEXOS</i> .....	75

# INTRODUCCIÓN

Desde tiempos antiguos los seres humanos han usado fertilizantes para mejorar las cosechas y enriquecer los suelos que usan para alimentarse, el cultivo de plantas permitió al hombre pasar de la vida nómada a una más sedentaria. Los plaguicidas químicos de uso agrícola han sido utilizados, al menos en pequeña escala, desde los tiempos antiguos. Los griegos y los romanos usaban el arsénico como plaguicida, y según informes, los chinos ya usaban compuestos arsenicales como plaguicidas en el siglo XVI. Sin embargo, no fue sino en la década de 1930 que aparecieron los primeros plaguicidas químicos sintéticos. Luego, tras la Segunda Guerra Mundial, se inició la producción y el uso de plaguicidas y fertilizantes químicos sintéticos a gran escala. Esto trajo como resultado un importante aumento inicial del rendimiento de los cultivos, con lo que el uso de plaguicidas químicos para la agricultura se extendió con rapidez, así como el empleo de fertilizantes más desarrollados (Salinas & Londoño, 2017).

Los fertilizantes son sustancias orgánicas o inorgánicas que contienen uno o varios elementos químicos indispensables para el crecimiento de los vegetales, y que, adicionadas al suelo, lo compensa de las deficiencias que pueda tener de estos elementos (Aycho, 2019). Los abonos, por tanto, aumentan la fertilidad de un terreno y mejora la productividad de los conreos. Para la vida y desarrollo de vegetales son necesarios una serie de elementos químicos denominados nutrientes. En la mayoría de casos no es necesario realizar un aporte suplementario ya que o se requieren en pequeñas cantidades como en el caso del Boro, Cobre, Hierro, Manganeso, Molibdeno y Zinc o se encuentran en el suelo en suficientes proporciones como en el caso del Calcio, Magnesio, y Silicio. Sin embargo, los macronutrientes son sustancias que participan activamente en la fotosíntesis y se necesitan en grandes cantidades. Estos nutrientes son el Nitrógeno (N), el Fósforo (P) y el potasio (K) y éstos no se encuentran en los abonos naturales en las cantidades requeridas (Carulla, 2016). El creciente aumento de la producción mundial de alimentos lleva a que la producción de fertilizantes aumente, con el fin de que los agricultores puedan responder a la creciente demanda de alimentos, especialmente de frutas y hortalizas.

Históricamente estos abonos se han comercializado en estado sólido (forma granular), pero cada vez se utilizan más los líquidos ya que presentan importantes ventajas como:

- Menor coste de personal al poder automatizar el proceso de abonado.

- Mínimo gasto de energía de las plantas en absorción de agua y nutrientes.
- Menores necesidades globales de unidades de fertilizantes aplicadas a tener menores pérdidas por lixiviación y evaporación.
- Control de la contaminación al tener menor lixiviación, por tanto, más respetuosos con el medio ambiente.

En la actualidad la producción y consumo de fertilizantes líquidos a nivel internacional presenta una tendencia creciente, debido fundamentalmente a la necesidad de incrementar la eficiencia de los insumos agrícolas y a las nuevas formas de aplicación de nutrientes, donde se destacan la fertirrigación y los sistemas de cultivos protegidos. Países líderes a escala mundial de su producción y empleo son Estados Unidos, Francia, España, Bélgica, Inglaterra, Italia, Israel. En Latinoamérica, se destacan Chile, Brasil, Argentina, seguidos por Colombia, Perú y Costa Rica. La incorporación de tecnologías de procesos e insumos en la producción de cultivos incrementa y eficientizan la producción de los fertilizantes (Hernández, 2019).

En Cuba se vienen realizando investigaciones acerca del tema desde la década de los 1980 del pasado siglo, obteniéndose resultados satisfactorios en distintas variantes. Este tipo de producción por lo general no es complejo y constituye una variante muy apropiada para su aplicación localizada.

En nuestro país no se producen fertilizantes líquidos NPK. Los que se utilizan son importados como, por ejemplo, el Bayfolan Forte que proviene de la firma Alemana Bayer Crop Science AG y contiene 11,5 % de nitrógeno, 8 % de fósforo como  $P_2O_5$ , 6 % de potasio como  $K_2O$  y una gran cantidad de micronutrientes (Pro-Agro, 2015). Este producto se importa en nuestro país a alrededor de 7,00 USD el litro (Libre, 2015).

Se conoce, que en nuestro país solo se han realizado pequeñas producciones de fertilizantes líquidos y ninguna institución los fabrica habitualmente a escala industrial. En tal sentido, en el Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas CIIQ, perteneciente al Grupo Empresarial de la Industria Química GEIQ, se han ejecutado proyectos de investigación e innovación tecnológica con vistas a la obtención y validación agro-económica de fertilizantes líquidos por la importancia que reviste su empleo, desde el punto de vista técnico y económico, fundamentalmente en los sistemas de riego localizado, donde en la actualidad no se utilizan los productos más adecuados.

En la Empresa Química de Cienfuegos, ubicada en la Zona Industrial No. 2, en el municipio de Cienfuegos, provincia de Cienfuegos, se lleva a cabo el proceso de producción de fertilizantes

mezclados NPK, proceso donde se generan derrames de materias primas y producto final, fundamentalmente en el trasiego de las materias primas durante la recepción en los beis de producción y durante el transporte a través de un cargador frontal hacia a tolva de alimentación en donde es inevitable que se produzcan derrames de barreduras, las cuales pudieran reducirse con buenas prácticas de manejo, aunque a pesar de ello, siempre van a generar como parte de los residuos tecnológicos de la planta. También ocurren acumulaciones de producto en algunos equipos de la planta como es el caso de los elevadores de cangilones en el fondo y en las diferentes tolvas. Estos derrames se recogen durante la limpieza y el mantenimiento de la planta y son conocidos como barreduras NPK del proceso, las cuales no pueden ser recirculadas al proceso, porque para realizar las fórmulas deseadas, las materias primas no pueden estar contaminadas con otras antes de realizar la formulación. Por lo que, estas barreduras se pueden emplear para la obtención de fertilizantes líquidos.

Teniendo en cuenta lo anterior, y que a partir de las mismas materias primas que se emplean para producir fertilizantes mezclados, pueden ser utilizadas en la producción de fertilizantes líquidos, se realiza un estudio dónde se pretende presentar una propuesta tecnológica para la producción de fertilizantes líquidos NPK como parte de un proyecto de desarrollo de la empresa.

### **Problema Científico**

La Empresa Química de Cienfuegos como parte de su programa de desarrollo requiere propuestas de tecnologías para la producción de fertilizantes líquidos NPK de gran valor comercial.

### **Hipótesis**

Si se implementa una tecnología eficiente para la producción de fertilizantes líquidos NPK, se logrará contribuir al desarrollo industrial de la empresa y al cumplimiento con las demandas de la agricultura y a la disminución de la contaminación del medio ambiente.

### **Objetivo general**

Proponer una tecnología de producción de fertilizantes líquidos NPK en la Empresa Química de Cienfuegos que diversifique sus producciones y aumente su valor agregado.

### **Objetivos específicos**

1. Establecer los fundamentos científicos que sustenten la investigación de las diferentes tecnologías de producción de fertilizantes líquidos NPK.
2. Desarrollar los modelos de balance de masa y energía para la tecnología propuesta.
3. Proponer el equipamiento necesario acorde con la tecnología seleccionada.

## **CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTES LÍQUIDOS NPK.**

Las plantas, para llevar a cabo los procesos fisiológicos y metabólicos indispensables para su desarrollo vegetal (germinar, crecer, llevar a cabo la fotosíntesis y la reproducción), necesitan tomar del medio los nutrientes esenciales. Las diversas combinaciones de estos nutrientes esenciales en diferentes proporciones dan lugar a la formulación de diferentes tipos de compuestos, denominados fertilizantes (Estarelles, 2017).

Los fertilizantes son elementos comunes en todas las explotaciones agrícolas y ganaderas. Estos son sustancias que contienen elementos o compuestos químicos nutritivos para los vegetales, de tal forma que las plantas los puedan absorber. Se utilizan para aumentar la producción, reponer y evitar deficiencias de nutrientes y conseguir un mejoramiento sanitario de las plantas (PLÚAS, 2018).

Estarelles (2017), señala que la fertilidad del suelo se entiende como su capacidad para suministrar todos y cada uno de los nutrientes que necesitan las plantas en cada momento, en la cantidad necesaria y en la forma asimilable.

La fertilización es una práctica agraria insustituible que tiene como objetivo principal mantener la fertilidad del suelo, restituye de los elementos extraídos por la cosecha y aquellos elementos que los suelos pierden por lavado, retrogradación y erosión.

### **1.1. Origen y desarrollo de los fertilizantes.**

Desde que el hombre comenzó a cultivar la tierra trató de compensar lo que de ella se extraía rotando los cultivos, dejando barbechos (sin cultivo por una o dos temporadas) o aportando abonos orgánicos concentrados, como estiércol o guano.

El origen de la industria mundial de fertilizantes se inició a mediados del siglo XIX, periodo en el que se empezaron a comercializar diversos tipos de fertilizantes. En el año 1842, J. B. Lawes, en el Reino Unido, patentó la fabricación del superfosfato procedente de huesos y de yacimientos de fosfatos naturales.

En cuanto al potasio, el aprovechamiento comercial de las minas, de donde se extrae, se inició en 1860, en Stassfurt (Alemania). La síntesis del amoníaco, patentada en 1908 por Fritz Haber en Alemania y el desarrollo a escala comercial de este descubrimiento, realizado por Carl Bosch, que diseñó la primera planta industrial, puede considerarse como uno de los más relevantes hitos en la historia de la fertilización. A partir de entonces, se produjo un empleo generalizado del nitrógeno

en la agricultura. Actualmente, alrededor del 40 % del nitrógeno consumido en el mundo por el hombre proviene de la fijación industrial (fertilizantes).

En Europa comenzó la fabricación de fertilizantes fosforados a partir de huesos y ácido sulfúrico. Los suelos europeos estaban pobres porque los métodos tradicionales no llegaban a compensar los nutrientes extraídos por los cultivos ante la creciente demanda de una población cada vez más numerosa.

En la década de 1950 comenzó la producción de fertilizantes Nitrógeno, Fósforo y Potasio (NPK) sólidos, siendo muy importantes para cumplir con la producción agrícola a gran escala. Estos en su mayoría son aplicables directamente al suelo de modo que las plantas asimilan sus nutrientes por las raíces. Sin embargo, las condiciones de absorción de los nutrientes presentan adversidades o deficiencias y la aplicación por vía radicular es limitada en tiempo y forma (Estarelles, 2017).

Gracias a técnicas como la fertirrigación y a la aparición de los fertilizantes NPK líquidos es posible suministrar los nutrientes y micronutrientes requeridos por los diversos tipos de cultivos y lograr controlar su desarrollo. La fertirrigación con fertilizantes líquidos es el sistema más eficaz para aportar a la planta los nutrientes que necesita en cada etapa de su desarrollo vegetativo. Además, disminuye fuertemente el impacto sobre el medio ambiente, así como las pérdidas de fertilizante, constituyendo, de esta forma, uno de los más claros exponentes de la racionalización y optimización en el uso de los fertilizantes.

Según el Manual Técnico - Propiedades generales de los fertilizantes (Riascos, 2004), los fertilizantes de uso agrícola son materiales orgánicos o inorgánicos, de origen natural como yacimientos minerales o manufacturados en procesos químicos, los cuales tienen como objetivo suministrar a las plantas uno o varios de los elementos nutricionales requeridos para su crecimiento. La forma química en la cual la planta absorbe todos los nutrientes necesarios para su correcto desarrollo es la misma independiente del material de origen, es decir, no importa si provienen de procesos de mineralización de rocas, descomposición de materiales orgánicos, o fertilizantes minerales. De manera general el P y K proceden de yacimientos naturales y el N de la síntesis de nitrógeno atmosférico con hidrogeno para formar amoniaco y CO<sub>2</sub> para formar Urea. El mundo actual exige alimentos y materias primas que cumplan con todos los conceptos de calidad tales como la apariencia, sabor, olor, persistencia, cocción, etc. La función de los diferentes nutrientes sobre todos estos requisitos es la misma sin importar si proceden de la

fertilidad natural del suelo, de materiales orgánicos o fertilizantes minerales. No obstante, para obtener la cantidad y calidad de los diferentes productos agrícolas es necesario tener niveles de suficiencia de los 18 elementos esenciales, lo cual se logra más fácilmente con fertilizantes minerales que con materiales orgánicos o contando solamente con la fertilidad natural del suelo (Vélez, 2014).

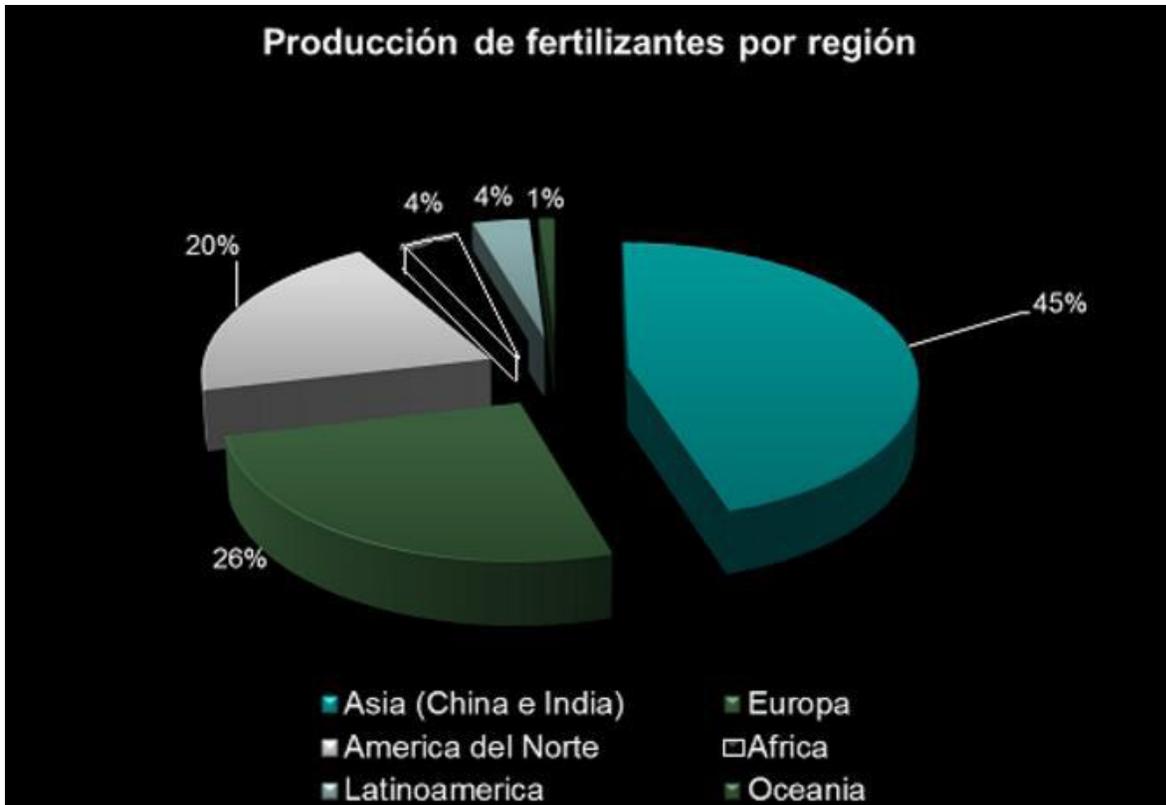
## **1.2. Consumo de los fertilizantes en el mundo.**

Según Zaragozano (2013), el análisis del consumo mundial de fertilizantes a lo largo de las últimas décadas, muestra que durante los años 1960 y 1970 se produjo un paulatino aumento del consumo de todos los nutrientes, más agudizado en el nitrógeno. A finales de 1980 se empezó a frenar esta demanda, llegando a producirse una continua disminución del consumo que en los años desde el año 1993 hasta el año 1996 llegó a un mínimo, para luego ir aumentando hasta la época actual, con un crecimiento sostenido. Se previó un incremento continuo de la demanda hasta 2015, en torno al 2,4 %. En 2010 la demanda fue de 169 millones de toneladas (IFA, 2011).

Según Hernández (2019), se estima que para finales del año 2050 la población mundial llegará a los 9 010 millones de personas, este aumento en la población mundial también demandará un aumento en la producción de alimentos. Sobre esto la Organización de las Naciones Unidas estima que se deberá incrementar alrededor de un 60 % la producción agrícola mundial. Aumentos como estos en la producción demandan un ajuste permanente en los manejos y técnicas de producción de cultivos, regulando cada vez más las entradas de insumos a los sistemas, y utilizando más eficientemente aquellos insumos aportados.

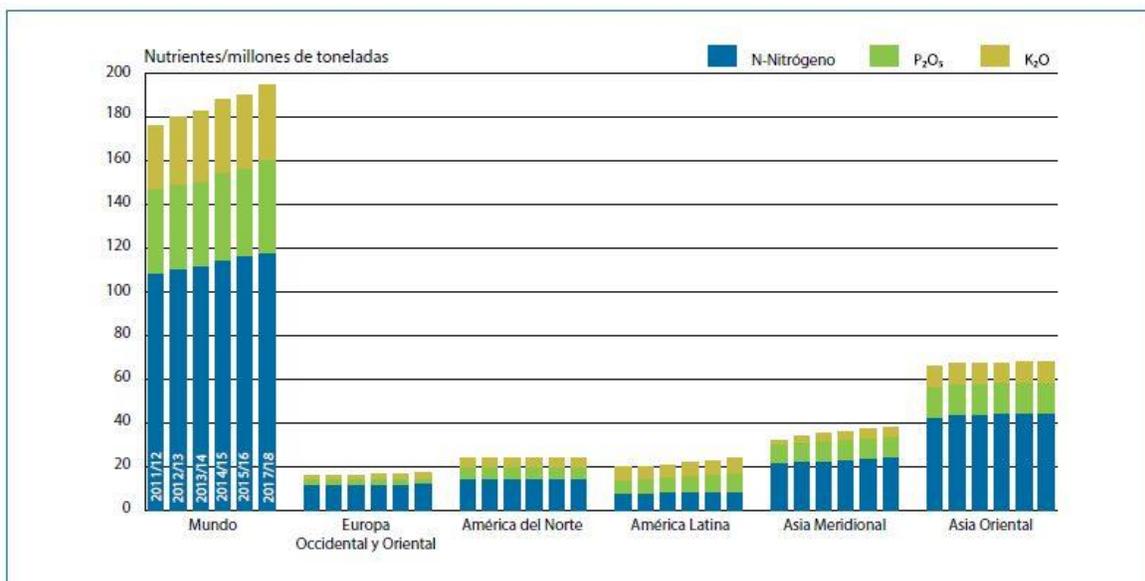
A nivel mundial, los fertilizantes más usados en la agricultura son en su orden el nitrógeno, el fósforo y el potasio. Los países que se encuentran como principales consumidores son por orden de importancia China, India, Estados Unidos, Países de Europa Central, y Brasil (Vélez, 2014).

En la siguiente figura, se muestra la producción mundial de fertilizantes por distintas regiones geográficas:



**Figura 1.1.** Producción mundial de fertilizantes por región. Fuente. (Salinas & Londoño, 2017).

Para establecer una comparación, en la siguiente figura, se muestra el consumo mundial de fertilizantes por distintas regiones geográficas hasta 2017, según datos de la International Fertilizer Association (IFA). Se observa una tendencia creciente del empleo de portadores NPK. (Torero, 2017).



**Figura 1.2.** Consumo de fertilizantes en las principales regiones de consumo nivel mundial.  
Fuente. (Torero, 2017).

### 1.3. Industria de los fertilizantes en Cuba.

La producción nacional de fertilizantes minerales, como productos a base de nitrógeno, fosfato y potasio, es muy escasa, al tiempo que el consumo aumenta de manera constante (Rosendi, 2017).

Por consiguiente, la demanda se satisface principalmente mediante importaciones.

Entre las dificultades señaladas por los principales productores de fertilizantes y plaguicidas en Cuba se destacan las siguientes (Torero, 2017):

1. Se considera que del 30 % al 60 % del equipamiento de las unidades de producción funciona adecuadamente, ya que el resto del equipamiento está obsoleto.
2. Conocimientos y competencias insuficientes y disponibilidad limitada para la prestación de servicios de mantenimiento fiables.
3. Limitadas capacidades de almacenamiento e infraestructuras deficientes a nivel industrial.
4. La demanda de fertilizantes a nivel nacional excede el suministro limitado de fertilizantes producidos e importados.
5. La producción de fertilizantes minerales sigue siendo baja, al tiempo que el consumo no deja de aumentar, y debe satisfacerse principalmente mediante las importaciones.
6. La producción de cultivos que no sean la caña de azúcar (verduras y cereales) requieren una optimización del uso de los fertilizantes.

En la siguiente tabla se muestran las capacidades de producción de las principales empresas estatales productoras de fertilizantes en Cuba, como la Empresa de fertilizantes y plaguicidas Revolución de Octubre en Camagüey, y la planta de producción de fertilizantes "Rayonitro", en Matanzas.

**Tabla 1.1.** Capacidades de producción de las empresas productoras de fertilizantes en Cuba.

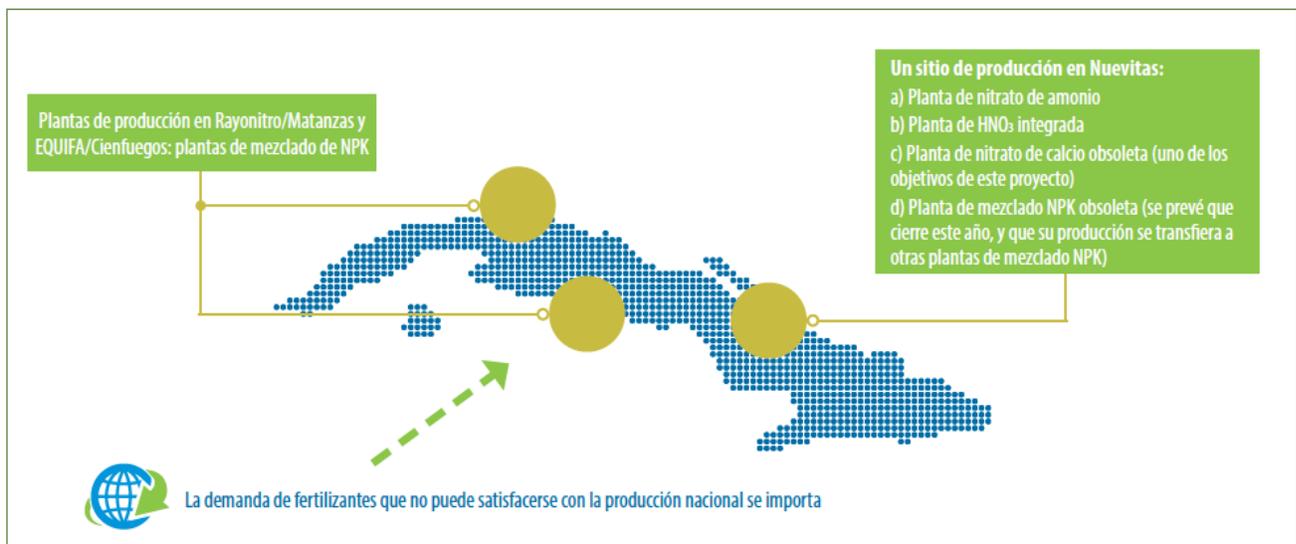
Nombre	Principales productos	Capacidad de producción anual
Empresa de Fertilizantes Revolución de Octubre, Camagüey	Fertilizante de Nitrato de Amonio	120 000 t
	Solución de Nitrato de calcio	480 000 L
	Ácido Nítrico	160 000 t

Planta de Producción de Fertilizantes "Rayonitro" Matanzas	Fertilizante granulado NPK	150 000 t
--	----------------------------	-----------

Fuente.(Torero, 2017).

Según todas las empresas estatales anteriormente mencionadas que producen fertilizantes son miembros asociados del Grupo Empresarial de la Industria Química (GEIQ), que promueve la producción local de fertilizantes.

La siguiente figura muestra cómo se encuentra distribuida la estructura actual de la industria de los fertilizantes en Cuba:



**Figura 1.3.** Estructura actual de la industria de los fertilizantes en Cuba. Fuente. (Torero, 2017).

#### 1.4. Clasificación de los fertilizantes.

La mayoría de los fertilizantes que se utilizan en la agricultura moderna son productos químicos o minerales, abonos orgánicos y residuos de plantas. Según Oliveira (2017), los fertilizantes se pueden clasificar en base a diferentes criterios:

Según su naturaleza:

- Fertilizantes orgánicos: en su sentido más amplio, se considera como abono orgánico toda sustancia de origen vegetal, animal o mixto (vegetal + animal), que se incorpora al suelo para mejorar su fertilidad.

- Fertilizantes minerales: son obtenidos mediante extracción o procedimientos industriales de carácter físico o químico cuyos nutrientes declarados se encuentran en forma mineral.
- Fertilizantes órgano-minerales: son una mezcla o combinación química de fertilizantes orgánicos y minerales.

Según su composición:

- Fertilizantes simples: están compuestos por un solo elemento principal (nitrogenado, fosfatado y potásico).
- Fertilizantes compuestos: son obtenidos químicamente y/o por mezcla conteniendo, al menos, dos nutrientes principales: Binarios: NP, NK, PK y Ternarios: NPK.
- Abonos inorgánicos con elementos secundarios.
- Abonos inorgánicos con micronutrientes.
- Otros abonos y productos especiales: como aminoácidos, ácidos húmicos o inhibidores de la nitrificación.

Según el nutriente que se desea aportar:

- Fertilizantes nitrogenados: urea, amoníaco, nitrato de amonio.
- Fertilizantes fosforados: superfosfato simple, superfosfato triple.
- Fertilizantes azufrados: yeso (sulfato de calcio).
- Fertilizantes potásicos: cloruro de potasio.
- Fertilizantes combinados: nitrofosfatos, NPK.

Según el lugar de aplicación del fertilizante:

- Fertilizantes edáficos: se incorporan al suelo de diferentes formas (al voleo, en bandas o hileras, en cobertera, entre líneas), luego las raíces de las plantas los absorben y los distribuyen a los distintos órganos.
- Fertilizantes foliares: se aplican sobre las hojas de los cultivos con la maquinaria agrícola adecuada para lograr una correcta distribución. No todos los vegetales presentan una cubierta epidérmica adecuada para recibir de manera eficiente fertilización foliar.
- Fertirrigación: los abonos se disuelven en el agua que se utilizará posteriormente en el riego. Esta forma de fertilizar supone un ahorro de agua, de energía, de contaminación ambiental y, es más segura para el trabajador.

Según el estado del fertilizante:

- Líquidos: se pueden aplicar directamente o disueltos en agua. Se pueden encontrar en forma de suspensiones o mezclas y soluciones. Estos se pueden encontrar en forma de soluciones sin presión, o soluciones con presión que necesitan ser aplicados con equipos especializados.
- Sólidos: suelen presentarse en polvo, granulados, macro-granulados, en pastillas, bastones, perlados, etc.

#### 1.4.1. Composición de los fertilizantes.

Los fertilizantes en su composición pueden llevar uno o varios componentes, los mismos se exponen en la siguiente tabla:

**Tabla 1.2.** Composición de los fertilizantes.

Nutrientes principales	Nitrógeno/fósforo/potasio
Nutrientes secundarios	Calcio/magnesio/sodio/azufre
Micronutrientes	Boro/cobalto/cobre/hierro/manganeso/molibdeno/zinc
Sustancias complejantes/Quelantes	EDTA/DTPA/EDDHA/etc.
Otras sustancias	Metales pesados/materia orgánica/etc.

Fuente. (Oliveira, 2017).

#### 1.4.2. Propiedades químicas de los fertilizantes.

Villegas and Granados (2006), detallan que las propiedades químicas de los fertilizantes determinan tanto su comportamiento en el suelo, como su manipulación y conservación. Entre ellas destacan:

1. Solubilidad: La solubilidad en agua o en determinados reactivos es determinante sobre el contenido o riqueza de cada elemento nutritivo en un fertilizante concreto.
2. Reacción del fertilizante sobre el pH del suelo: Viene determinada por el índice de acidez o basicidad del fertilizante, que se corresponde con la cantidad de cal viva que es necesaria para equilibrar el incremento de acidez del suelo (fertilizantes de reacción ácida) o producir un incremento de pH equivalente (fertilizantes de reacción básica).
3. Higroscopicidad: Capacidad de absorber agua de la atmósfera a partir de un determinado grado de humedad de la misma. Esta absorción puede provocar que una parte de las

partículas se disuelvan, con lo que se deshace la estructura física del fertilizante. Generalmente, en cuanto mayor es la solubilidad del fertilizante en agua, mayor es su higroscopicidad.

### **1.5. Los fertilizantes NPK.**

Los fertilizantes complejos NPK son productos que contienen dos o tres nutrientes primarios (N, P, K) y que, además, pueden contener nutrientes secundarios y micronutrientes (C. N. Díaz, 2014). Se aplican para equilibrar el contenido del suelo en elementos nutritivos de acuerdo con los contenidos del mismo, considerando las necesidades del cultivo que se va a implantar y dependiendo del rendimiento que se espera conseguir. Se pueden encontrar en estado sólido (forma granular) o líquido (Mantilla, 2016).

El nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) son considerados los macronutrientes de las plantas porque estas los requieren en cantidades muy altas (Carulla, 2016). Los macronutrientes son los elementos básicos en los programas de fertilización de la mayoría de los cultivos y generalmente son incluidos en las fórmulas completas de fertilizantes, las cuales se fabrican a partir N, P y K como componentes. La fertilización balanceada de estos nutrientes tiene gran efecto en el rendimiento de los cultivos (Meléndez & Molina, 2003).

En la mayoría de los suelos y cultivos, la obtención de rendimientos altos está muy relacionada con el suministro adecuado de N, P y K. De ahí que la industria de fertilizantes se haya desarrollado a partir de estos tres elementos básicos. Las deficiencias de estos macronutrientes son frecuentes en muchos suelos ácidos de regiones tropicales. Este factor junto con el mejoramiento de la tecnología agrícola y el establecimiento de nuevas variedades de mayor rendimiento y extracción de nutrientes, han incrementado el consumo de fertilizantes durante los últimos años (Vélez, 2014).

#### **1.5.1. Nitrógeno.**

El nitrógeno (N) es quizás el nutriente que con mayor frecuencia limita los rendimientos en zonas tropicales. Es el nutriente determinante del crecimiento y desarrollo de la planta (Fertirrigación, 2016).

De las tres formas posibles en las que el nitrógeno se puede presentar en el suelo, las plantas lo absorben mayoritariamente en forma de ion nitrato ( $\text{NO}_3$ ). Las formas amoniacales ( $\text{NH}_4$ ) y ureicas requieren ser transformados a forma nítrica para poder ser asimilados por los cultivos de modo que

la disponibilidad del nitrógeno se lleva a cabo en función de factores como la humedad o la temperatura del suelo. La fracción nítrica es la más eficiente por ser directamente asimilable, la amoniacal se fija en el complejo del suelo por lo que las pérdidas por volatilización son muy reducidas (Litardo, 2019).

C. N. Díaz (2014) dice que, el nitrógeno forma parte de los ácidos nucleicos, los cuales controlan la formación de proteínas y las características genéticas de la planta. El nitrógeno junto con el magnesio forma parte de la molécula de clorofila, por lo cual está asociado con la coloración verde de los tejidos vegetales y la captación de energía lumínica en la fotosíntesis. El adecuado suministro de nitrógeno promueve el crecimiento vegetal, incrementa la relación biomasa / raíces, y es esencial para la formación de frutos y granos.

La deficiencia de nitrógeno usualmente se inicia con la aparición de un color verde pálido o amarillento en las hojas inferiores debido a que es un elemento móvil dentro de la planta. Posteriormente, las hojas más viejas comienzan a necrosarse desde el extremo apical hasta los bordes y el centro de la lámina foliar. Los síntomas pueden extenderse a toda la planta, causando reducción del crecimiento, muerte de hojas y disminución de la floración y producción de frutos y granos. La materia orgánica es la principal fuente de nitrógeno en los suelos, siendo más del 90 % del nitrógeno nativo del suelo de origen orgánico (Barbieri, Saínz, & Maringolo, 2010).

Según lo planteado por Meléndez and Molina (2003), los fertilizantes nitrogenados se fabrican utilizando nitrógeno atmosférico mediante tres procesos principales:

- a) Oxidación directa del nitrógeno.
- b) Cianamida (Frank y Caro 1898).
- c) Producción sintética de amoníaco.

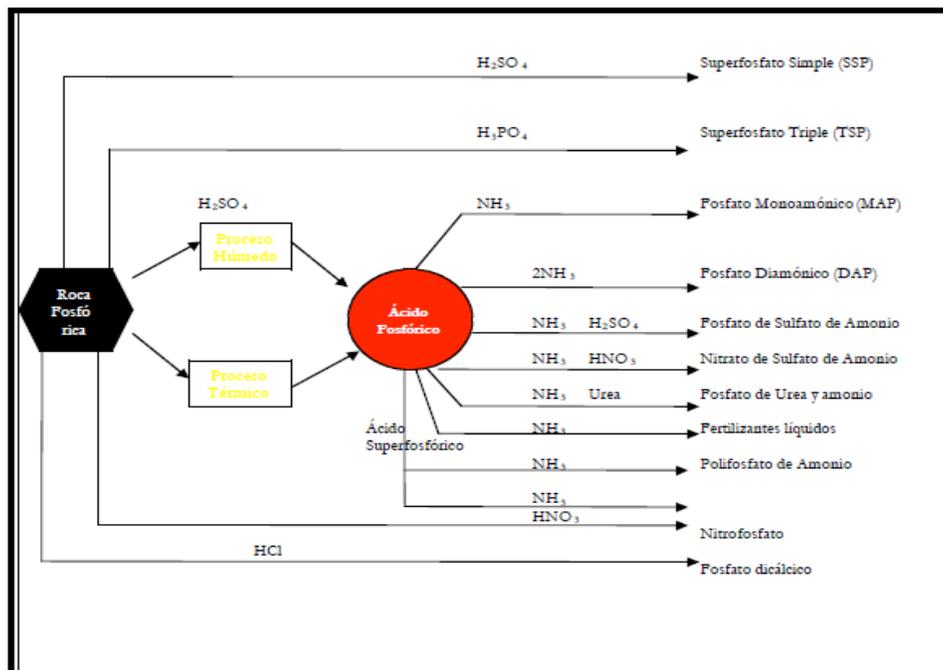
### **1.5.2. Fósforo.**

Litardo (2019), detalla que el fósforo es el segundo elemento de mayor importancia en lo que concierne al crecimiento de las plantas, producción de cultivos, e intervenir en la calidad de los mismos. Se considera como uno de los elementos que mayormente limita la producción agraria, hay que añadir que en el suelo existen diferentes formas químicas del fósforo de forma inorgánica y orgánica, de acuerdo a las estimaciones realizadas se ha calculado que el fosforo aplicado como fertilizante solo se aprovecha del 10 % al 20 % en el transcurso del primer año mientras que los siguientes se precipita de las formas de más baja solubilidad.

Debido a que el fósforo se mueve rápidamente de los tejidos viejos a los tejidos jóvenes, su deficiencia aparece primero en las partes bajas de las plantas (Duggan, 2016). Las hojas viejas pueden tornarse de un color verde oscuro al principio, y luego pueden aparecer manchas o zonas de color púrpura o rojizo, especialmente en cultivos de gramíneas como maíz y sorgo. En muchos cultivos, la deficiencia de fósforo es difícil de detectar en el campo. La deficiencia de fósforo causa que las plantas se queden pequeñas o enanas, con escaso desarrollo radicular. También disminuye la tasa de crecimiento, reduce la floración, el cuaje de flores y el rendimiento de granos y frutos (Meléndez & Molina, 2003).

El fósforo es un elemento que con frecuencia se presenta deficiente en muchos suelos ácidos de regiones tropicales. La causa principal se debe al grado de meteorización del suelo, su escasa movilidad, y al fenómeno de fijación de fósforo por las arcillas del suelo (Lozano et al., 2012). La mayor parte del fósforo nativo en el suelo se encuentra en formas no disponibles para las plantas, principalmente como formas orgánicas, o como fosfatos inorgánicos de hierro (Fe), aluminio (Al), y calcio (Ca).

La siguiente figura muestra la descripción del esquema de fabricación de los fertilizantes fosfatados:



**Figura 1.2.** Esquema de fabricación de fertilizantes fosfatados. Fuente.(Meléndez & Molina, 2003).

### **1.5.3. Potasio.**

El potasio, con excepción del nitrógeno, es el elemento absorbido en mayor cantidad por la mayoría de los cultivos (PLÚAS, 2018). A pesar de que en muchos suelos el contenido de potasio total es muchas veces superior a potasio absorbido por las plantas, solo una pequeña fracción se encuentra disponible. De ahí que sus necesidades son con frecuencia altas para satisfacer los requerimientos de los cultivos y establecer una nutrición balanceada (Duggan, 2016).

El potasio realiza múltiples funciones en la planta, entre las que se pueden citar (Meléndez & Molina, 2003):

- Fomenta la fotosíntesis mediante la activación de numerosas enzimas.
- Incrementa el efecto de los abonos nitrogenados.
- Favorece la síntesis de proteínas y la fijación biológica de nitrógeno atmosférico en cultivos de leguminosas.
- Mejora la eficiencia en el consumo de agua, al aumentar la presión osmótica de las células, volviéndolas más turgentes. De esta forma, las plantas bien provistas de potasio cierran rápidamente sus estomas, impidiendo la pérdida de humedad durante períodos de déficit hídrico.
- Acelera el flujo y translocación de los productos asimilados. Los azúcares y almidones formados durante la fotosíntesis, son transportados desde las hojas hasta los órganos de reserva (frutos, semillas, tubérculos, etc.) con la participación del potasio. Este elemento cumple un papel vital en el llenado de granos y semillas.
- Incrementa el rendimiento y calidad de la cosecha, mejorando el sabor, el contenido de azúcares y el color de los frutos; el tamaño, número y peso de los granos; el tamaño y peso de raíces y tubérculos, etc.
- Favorece la resistencia a enfermedades al fortalecer los tejidos vegetativos y mejora las propiedades de almacenamiento pos-cosecha de frutas y hortalizas, al promover mayor firmeza y resistencia de los tejidos.

La deficiencia de potasio se presenta en hojas viejas por ser un elemento inmóvil. Aparece como una clorosis en los bordes y puntas de las hojas, con necrosis posterior. Al avanzar los síntomas la hoja se cae. La deficiencia de potasio causa también la formación de tejidos débiles, entrenudos más cortos, plantas más susceptibles a enfermedades, menor peso y tamaño de granos y frutos, disminución en el contenido de azúcares, etc. (Murillo, 2011).

## **1.6. Los fertilizantes líquidos.**

Los fertilizantes líquidos son materiales que contienen uno o más nutrimentos de las plantas dispersos en un medio líquido, incluyendo los fertilizantes foliares. Sin tener en cuenta éstos últimos, se define como fertilizante líquido o fluido todo material fertilizante que puede ser manipulado, almacenado, transportado y aplicado en forma líquida, y no requieren tratamientos previos de disolución (Molina, 2003).

Los fertilizantes líquidos son más fáciles de transportar, almacenar y distribuir en el campo, y se adaptan perfectamente a los sistemas de aplicación de riego, principalmente los de aspersión y goteo. Además, constituyen una alternativa muy eficiente para producir fuentes homogéneas con menor costo de almacenamiento y manipulación (Melgar & Duggan, 2014).

### **1.6.1. Origen y desarrollo de los fertilizantes líquidos.**

Según López and Barrantes (2017), la utilización de los fertilizantes líquidos se remonta a tiempos ancestrales. Así, en Grecia se transportaban residuos orgánicos urbanos, que se destinaban a huertas y naranjos, constituyendo una forma temprana de uso de fertilizantes fluidos. En China se utilizaban prácticas similares. Posteriormente el gran desarrollo de la industria y adopción de fuentes fluidas tuvo lugar principalmente en EE. UU y en menor medida, en algunos países europeos, asiáticos y Australia.

Durante finales del siglo XVIII los agricultores utilizaban reservorios para recolectar estiércol líquido y residuos orgánicos provenientes de corrales, que se aplicaban en los campos. Recién a comienzos del 1800 comenzaron a realizarse experimentos con soluciones utilizando sales solubles y en 1923 se instala en California la primera planta de fertilizantes fluidos comercialmente exitosa, basada en la disolución de sales solubles en agua. Posteriormente, tuvo lugar cierta adopción del uso de formulaciones líquidas basadas en la disolución de sales solubles en agua, aplicados con diferentes sistemas como hidroponía o fertirriego (Albertos, 2006).

La siguiente tabla se muestra la evolución del uso de los fertilizantes líquidos durante el siglo XIX.

**Tabla 1.3.** Primeros estadios del uso de los fertilizantes fluidos durante el siglo XIX.

Año	Estadio en desarrollo de fertilizantes fluidos	Hitos destacados
1930	Hidroponía	Uso de soluciones diluidas, económicamente inviables, aunque se avanzó en el conocimiento de soluciones líquidas
1940	Fertirriego	Aplicación directa de ácido fosfórico a través de sistemas de riego en el oeste de EE.UU
1953	Primeras mezclas de fertilizante	Se realizan las primeras mezclas de ácido fosfórico y amoníaco en solución. Esta solución con alta temperatura se la mezclaba con fuentes de potasio (4-10-10) y luego comenzó a utilizarse urea como materia prima obteniendo formulaciones como 9-9-9 y 12-6-6. En este estadio, el desarrollo de los equipos de aplicación de fertilizantes fluidos era muy pobre.

Fuente.(Melgar & Duggan, 2014).

La gran expansión en la adopción de fertilizantes fluidos que tuvo lugar a partir de la década del 1960 en EE. UU y en menor medida en algunos países europeos (Francia, Alemania, Reino Unido, España), se puede vincular con los siguientes atributos y ventajas de éste tipo de fertilizantes (Rodríguez, Gil, & Soto, 2014):

- Posibilidad de utilización de materias primas de bajo costo en las plantas de producción.
- Alta eficiencia de uso de nutrientes y menor riesgo ambiental debido a la aplicación como arrancador o en fertirriego.
- Excelentes vehículos para la aplicación de micronutrientes, ya que permiten una exacta y uniforme distribución de los mismos en el suelo.
- Posibilidad de aplicación conjunta con agroquímicos, en especial herbicidas, reduciendo la cantidad de aplicaciones.
- Facilidad, rapidez y mayor precisión de aplicación en relación a fuentes sólidas.

### **1.6.2. Consumo mundial de los fertilizantes líquidos.**

De la misma forma que los fertilizantes sólidos, la producción de los fertilizantes líquidos en el mundo viene manifestando un significativo auge, influenciado fundamentalmente por el aumento constante de la población mundial y la demanda de insumos alimenticios, así como por las ventajas que ofrece el uso de los mismos. A diferencia de EE. UU, donde el nitrógeno anhidro y/o las suspensiones representan fuentes fluidas importantes en términos de volumen comercializado, en América del Sur las principales fuentes fluidas utilizadas son soluciones líquidas nitrogenadas, nitro-azufradas o multielementales y en menor medida soluciones fosfatadas líquidas. Dentro de las soluciones se pueden diferenciar dos grupos (Estarelles, 2017):

- 1) Nitrógeno anhidro (82 % de N), que se almacena y transporta en forma presurizada en estado líquido y se convierte a gas en el suelo durante su aplicación (inyección en profundidad).
- 2) Soluciones mononutrientes o multinutrientes. De estas últimas, las nitrogenadas no presurizadas, son las más difundidas a nivel global.

### **1.6.3. Clasificación de los fertilizantes líquidos.**

Según Bautista and Vásquez (2020), los fertilizantes líquidos se clasifican de acuerdo a como se encuentre el nutrimento disperso en el medio líquido, en soluciones y suspensiones:

- Soluciones: son disoluciones líquidas compuestas por un solvente, que generalmente es el agua, y uno o varios solutos, que pueden ser gases (amoníaco), líquidos (ácidos o fertilizantes líquidos) o sólidos (sales o quelatos).
- Suspensiones: son fertilizantes líquidos parcialmente disueltos, en los que una parte del soluto o sal se mantiene suspendida en el líquido en forma de cristal fino, generalmente menor de 0,8 mm de diámetro. La sal se mantiene suspendida por un coloide como la atapulgita o bentonita.

La ventaja de las suspensiones es que permite formular fertilizantes líquidos de mayor concentración de nutrimentos, lo que reduce los costos de transporte y almacenamiento (Kafkafi & J.Tarchitzky, 2012).

También presentan menos problemas de incompatibilidades, y se puede usar sales de menor pureza y agua de inferior calidad. Como desventaja se encuentran el hecho que pueden obstruir mangueras

y boquillas de riego, causar abrasión en los equipos de bombeo, y la posibilidad de que ocurra precipitación de sales durante períodos prolongados de almacenamiento (Pérez, Martín, & Asensio, 2011).

Melgar and Duggan (2014), indica que existe una gran diversidad de tipos de fertilizantes fluidos utilizados en los agro-sistemas, dependiendo del país; fase del desarrollo del mercado de fertilizantes; condiciones agroecológicas; características de los sistemas de producción (escala de las explotaciones, tipo de cultivos, tecnologías de procesos), entre otros factores. La siguiente tabla muestra los principales tipos de fertilizantes fluidos utilizados en la agricultura.

La siguiente tabla muestra los diferentes tipos de fertilizantes fluidos que son más utilizados en la agricultura.

**Tabla 1.4.** Principales fertilizantes fluidos utilizados en la agricultura.

<b>Tipo de fertilizante</b>	<b>Ejemplo</b>
Nitrogenados	N anhidro; UAN; soluciones de urea; soluciones de nitrato de amonio; soluciones de agua amoniacal
Fosfatados	Polifosfatos de amonio; suspensiones; soluciones ácidas
Potásicos	Tiosulfato de potasio; soluciones de cloruro de potasio, suspensiones NPK con cloruro de potasio
Azufrado	Soluciones de tiosulfato de amonio o sulfato de amonio; suspensiones de azufre elemental
Micronutrientes	Quelatos de Zn y Cu; sulfatos de Zn y Cu; Solubor
Mezclas	Suspensiones NKP; soluciones NPK o NS; soluciones ácidas NP o NPS

Fuente.(Melgar & Duggan, 2014).

#### **1.6.4. Propiedades de los fertilizantes líquidos.**

Resulta de suma importancia conocer la composición química de los fertilizantes para que actúen de la manera más positiva sobre un cultivo y los suelos, con ello se reduce al mínimo repercusiones negativas, de ahí que el análisis de las propiedades cobre tanta significación (López & Barrantes, 2017). Dentro de las propiedades de los fertilizantes líquidos están:

1. Grado.

2. Densidad.
3. Acidez.
4. Viscosidad.
5. Temperatura de cristalización.
6. El grado de limpieza o claridad.

Según el grado o análisis del fertilizante es el porcentaje de nitrógeno, fósforo y potasio que el fabricante garantiza que está contenido en el fertilizante.

Es la concentración de nutrimentos declarada por el fabricante, es decir el porcentaje en peso que tiene cada nutrimento para los cultivos. El orden a suministrar es N – P - K expresado como elementos o como N, P óxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) y óxido de potasio ( $K_2O$ ) (grado equivalente), especificando también si se incluyen nutrientes secundarios silicio (S), y magnesio (Mg) o micro nutrientes. Se debe aclarar que el contenido se expresa en porcentaje de nutrimentos sobre el volumen, en este último caso debe considerarse la densidad (Riascos, 2004).

A los fertilizantes líquidos por ser comercializados tanto por volumen como por peso, la principal propiedad física que los caracteriza es su densidad. Es un dato clave a tener en cuenta, ya que el grado se declara sobre la base de un volumen o sobre la base del peso. La densidad da una idea de la cantidad total de nutrimentos en el volumen. Este valor permite trasladar rápidamente de unidades volumétricas a gravimétricas. En términos prácticos, la densidad de las soluciones nitrogenadas o nitro-azufradas, tienen una densidad asociada a su contenido porcentual de nitrógeno (N) siempre y cuando no se presente contaminación por otros compuestos. Así, por ejemplo, si el contenido de nitrógeno es de 30 %, la densidad de alrededor de  $1,3 \text{ g/cm}^3$ , mientras que si la solución posee de 27 % de nitrógeno a 28 % de nitrógeno, la densidad es de  $1,28 \text{ g/cm}^3$  (Argandar, 2007).

El pH, permite saber la reacción del producto y evaluar el grado de peligrosidad en el manipuleo. En las soluciones nitrogenadas y nitro-azufradas más comunes, el pH es un indicador indirecto de las proporciones de materias primas utilizadas en la formulación.

Las más comunes son urea, nitrato de amonio, sulfato de amonio, y más recientemente también se utiliza el tiosulfato de amonio como fuente de azufre (Argandar, 2007).

La viscosidad expresa la resistencia del fluido al escurrimiento. Es importante para el dimensionamiento del sistema de transporte por tuberías de las formulaciones y para la aplicación mediante equipos pulverizadores. Para las soluciones se recomiendan viscosidades que no superen

los  $0,010 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$  a  $0,0254 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$  a una temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ó  $0,0407 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$  a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . En cambio,

para las suspensiones se recomienda que no excedan los  $0,10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ó  $0,152 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$  a  $0^\circ\text{C}$ .

Los principales factores que inciden en esta propiedad son la temperatura y la presencia de impurezas en el producto. Este parámetro puede determinarse con un viscosímetro (Argandar, 2007).

La temperatura de cristalización es aquella a la cual un compuesto químico presente en el fertilizante líquido, normalmente una sal, anteriormente soluble, cristaliza y precipita en función de la reducción de la temperatura de este fluido. Es una propiedad de gran importancia práctica, sobre todo en regiones donde el producto se almacena en condiciones de baja temperatura (por debajo de los  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ), generando la cristalización de las formulaciones y por ende dificultando su utilización en campo (Argandar, 2007).

El grado de limpieza o claridad es una propiedad determinada mediante colorimetría y es un indicador de calidad en el proceso de fabricación. Las soluciones verdaderas no deberían tener ningún sólido en suspensión. Sin embargo, es posible que se generen cambios en la coloración del producto por variaciones en las características de la fuente azufrada (Argandar, 2007).

#### **1.6.5. Métodos de obtención de los fertilizantes líquidos.**

La formulación de mezclas NPK (soluciones líquidas) a nivel de plantas de distribución minorista es una práctica habitual en algunos países, principalmente en EE.UU. Se utilizan sistemas de mezclado en frío o mezclado en caliente (Rosendi, 2017).

El sistema de mezclado en frío es el más sencillo, donde no ocurre liberación de calor durante la mezcla. Este sistema consiste en la mezcla de los portadores de nutrientes seleccionados, teniendo en cuenta el orden de adición de los mismos para lograr el producto deseado. La tecnología de este tipo de sistema es muy sencilla y consta de varias operaciones unitarias; Agitación y Mezclado, que ocurre dentro de un tanque agitado mediante un impelente mecánico, para luego pasar a la Filtración con el objetivo de eliminar impurezas presentes, que dependen fundamentalmente de los portadores empleados (Jaramillo, 2015).

Por su parte, el sistema de mezclado caliente, consiste en la neutralización del ácido

fosfórico (de extracción o térmico) con amoníaco hasta pH 6,5. En dependencia del esquema de obtención puede emplearse como agente neutralizante el amoníaco acuoso (solución amoniacal) o anhidro. Existen dos clases de fertilizantes líquidos que se diferencian según la forma del fósforo empleado para su obtención: ácido ortofosfórico y ácido superfosfórico (el último presenta en sí una mezcla de ácido orto y polifosfórico con contenido de  $P_2O_5$  de 72 % a 80 %). El aumento del contenido de nitrógeno en la formulación se consigue al añadir nitrato de amonio, urea o una mezcla de ambos, y la cantidad de  $K_2O$  necesaria se aporta con una sal de potasio que generalmente es el cloruro de potasio (Bordoli & Barbazán, 2010).

La diferencia del mezclado en caliente, respecto al mezclado en frío, es que la reacción exotérmica generada por el ácido fosfórico y el agua amoniacal o nitrógeno anhidro, provee el calor necesario para lograr la disolución de los fertilizantes durante el mezclado. Por lo tanto, no se utilizan fuentes externas de calor, como agua caliente o vapor (Agrotrapiche, 2014).

El grado de la formulación depende de los siguientes factores:

1. Tipo de materias primas utilizadas.
2. Temperatura de cristalización deseado.
3. Temperatura de almacenamiento.
4. Solubilidad de los fertilizantes utilizados en la mezcla.
5. Solubilidad de las sales utilizadas en la mezcla final.
6. Contenido de Polifosfatos de Amonio APP en la mezcla.

#### **1.6.6. Fuentes de Materias Primas.**

Dentro de las fuentes de materias primas más empleadas en la producción de fertilizantes líquidos NPK figuran las siguientes (Casanova, Barbazan, & Barreto, 2015):

Portadores nitrogenados:

- Urea: Es un excelente material para la producción de fertilizantes líquidos, posee un alto contenido de nitrógeno (46 %) y una buena solubilidad en agua, es poco corrosivo, higroscópico absorbiendo agua fácilmente del aire, reacciona con el ácido fosfórico para dar un fosfato de urea ( $NH_2CONH_3H_3PO_4$ ) el cuál se disuelve rápidamente en agua.
- Nitrato de amonio ( $NH_4NO_3$ ): Es la forma más generalizada de fertilizantes nitrogenados, contiene 34 % de nitrógeno y su asimilación es muy fácil para las plantas, es un producto higroscópico, puede causar ciertos riesgos de incendios, y principalmente explosiones,

además, es corrosivo, en presencia de sales de potasio forma nitrato de potasio que es poco soluble a bajas temperaturas. El nitrato de amonio se disuelve fácilmente en agua con absorción de calor.

- Amoníaco anhidro ( $\text{NH}_3$ ): Es el fertilizante que más se usa para la aplicación directa en el mundo, contiene 82 % de nitrógeno y menos de 5 partes por millón (ppm) de aceite, es la fuente más económica y necesita condiciones especiales para su manipulación, transportación, almacenamiento y aplicación, ya que es una solución con presión.
- Soluciones de urea - nitrato de amonio (UAN): Son soluciones sin presión, su consumo se ha incrementado considerablemente en los últimos años debido a las ventajas técnico-económicas que presentan, se producen diferentes grados tales como 28 – 0 – 0, 30 – 0 – 0, 32 – 0 – 0, en dependencia de la temperatura de aparición de cristales (TAC), se componen de Nitrato de Amonio y Urea en proporciones adecuadas para alcanzar la máxima solubilidad.
- Sulfato de amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ : Contiene 21 % de nitrógeno, su solubilidad en agua es baja y por tanto no es un material de interés para la producción de fertilizantes líquidos.
- Agua amoniacal: La solución más empleada contiene alrededor de 20 % a un 25 % de amoníaco y no ejerce presión manométrica a temperaturas inferiores a los 360 °C, para su aplicación directa hay que inyectarla a cierta profundidad en el suelo (menor que la del amoníaco anhidro).
- Tiosulfato de amonio: Fertilizante líquido muy ampliamente usado en Estados Unidos. Aporta además cantidades considerables de azufre.

Portadores fosfatados:

- Ácido fosfórico (orto): Su contenido de  $\text{P}_2\text{O}_5$  varía entre 54 % y 62 %. Constituye más del 90 % de la producción de fertilizantes fosfatados. Se obtiene en lo general por dos procesos: vía húmeda y vía térmica. Hay que tener en cuenta para la producción de fertilizantes líquidos, su contenido de impurezas tales como hierro, magnesio y carbono.
- Fosfatos de amonio: Son los fertilizantes fosfatados más extendidos, fundamentalmente el fosfato diamónico (DAP), por su alta concentración y buenas propiedades físicas, aporta además nitrógeno y sus calidades varían: 11 – 55 – 0, 18 – 46 – 0, 13 – 52 – 0 y 16 – 48 – 0, entre otras.

Portadores potásicos:

Rosendi (2017), indica que hay cuatro fertilizantes potásicos disponibles para ser empleados en la producción de fertilizantes líquidos, los cuales se mencionan seguidamente en orden creciente de importancia del anión acompañante en la molécula que satisface las necesidades de nutrientes de los cultivos:

- Cloruro de potasio: Es la principal fuente de potasio en la obtención de fertilizantes líquidos. Posee 60 % de  $K_2O$  y su costo es relativamente más bajo, se poder obtener soluciones de hasta 9 % de  $K_2O$ .
- Sulfato de potasio: Posee un 50 % de  $K_2O$ , su solubilidad es baja y por este motivo no es de interés para la producción de fertilizantes líquidos.
- Fosfato de potasio: Aporta además fósforo y se emplea solo en casos especiales por su elevado costo, pueden obtenerse con él soluciones de alto contenido de potasio.
- Nitrato de potasio: Su calidad comercial es 13 – 0 - 44, aportando además nitrógeno, su empleo en fertilizantes líquidos está limitado a formulaciones con menos del 6 % de  $K_2O$ , debido a su baja solubilidad.

### **1.7. Ventajas y desventajas en la utilización de fertilizantes líquidos.**

Según lo planteado por (Gutiérrez, 2017), los fertilizantes líquidos cumplen la misma función de suministrar los nutrientes a las plantas que los tradicionales fertilizantes sólidos. Sin embargo, estos presentan frente a los fertilizantes habituales una serie de ventajas, la principal de ellas es que están listos para su aplicación junto a la fertirrigación. Entre otras de sus ventajas se destacan:

- Los nutrientes que contiene están totalmente disueltos y fácilmente asimilables por la planta, no necesitando ser diluidos sino aplicados directamente al agua de riego para la fertilización del cultivo.
- Facilitan el manejo ya que basta con colocarlos en un tanque y regular la dosis necesaria a través de la bomba de inyección de la máquina de riego. Son diluciones perfectas y no provocan precipitaciones ni obturaciones en los sistemas de riego localizado.
- Su manejo es más rápido, eficiente y seguro que los fertilizantes sólidos siempre y cuando se cumpla las normas básicas de Manejo de Fertilizantes Líquidos.
- Los distintos fertilizantes se pueden combinar en función del estado fenológico del cultivo, el suelo, el agua, etc., cambiando fácilmente la solución nutritiva final o usando una fórmula en cada fase del desarrollo, debido al constante equilibrio de nutrientes.

- Facilidad de manipulación por medio de bombas y tuberías, mientras que en los sólidos se complica por el uso de palas mecánicas, transportadoras, trasiego de sacos, etc. Esto representa un ahorro de mano de obra en todos los sectores.
- Esquemas tecnológicos más sencillos, eliminándose etapas como evaporación, granulación y enfriamiento de sólidos.
- Tiene el máximo de flexibilidad en formulación, igualados solo por el método de obtención de complejos con pre neutralizador.
- Se eliminan los factores negativos que acompañan a los fertilizantes sólidos, en polvo fundamentalmente, como son la segregación y la compactación.
- Aplicación más simple con máquinas sencillas de bajo costo de inversión al tratarse de líquidos sin presión. Puede citarse el uso de un tanque móvil en el campo que alimenta una tubería perforada.
- La velocidad de aplicación puede aumentarse al doble o más en base al aumento de la marcha del tractor y el ancho de la faja a cubrir.
- Posibilidad de utilizar el regadío en todas sus formas, para la dosificación de fertilizantes.
- Se asegura un mejor cubrimiento del suelo y una distribución homogénea de los nutrientes.
- La posibilidad de la aplicación del fertilizante al realizar alguna labor de cultivo mediante adaptaciones sencillas.
- La posibilidad de la aplicación simultánea de plaguicidas, formulando en el mismo campo, utilizando los mismos equipos.
- La forma en que se presenta el fósforo es totalmente soluble en agua.
- Son menores las necesidades de energía y no se requieren ni evaporación ni secado.
- No hay problemas de polvo, de humos y vapores en la fabricación o en el uso de los líquidos.
- El almacenamiento, la manutención y la carga para la expedición, son menos costosas y requieren menos mano de obra que en el caso de los sólidos.

Como toda sustancia, a pesar de sus ventajas, su uso también supone diferentes desventajas como son:

- Fórmulas de menor concentración de nutrientes que los fertilizantes sólidos debido a limitaciones de solubilidad en agua
- Requiere equipo de almacenamiento y aplicación.

- El fertilizante líquido es corrosivo por lo que deben tomarse precauciones para proteger el equipo de aplicación, bombas, etc.
- En algunos casos el costo por unidad de nutrimentos es más alto que en productos sólidos.

### **1.8. Los fertilizantes líquidos y el fertirriego.**

Según Helfgott, Cañamero, and Laguna (2018), la fertigación, nutrigrigación o fertirrigación, es la técnica de incorporar los fertilizantes disueltos en el agua de riego con el objetivo de regar y nutrir al mismo tiempo un cultivo, combinando los dos principales factores de desarrollo: el agua y los nutrientes.

Se trata de una técnica o práctica que en zonas de cultivo intensivo tenía una cierta importancia, pero en la actualidad con el auge de los sistemas de riego localizado, se está aplicando de una manera generalizada en todo el mundo (García, 2009).

La fertilización líquida y la fertirrigación son dos técnicas que se relacionan estrechamente entre sí para combinar el uso de agua y sistemas de riego en la aplicación de nutrimentos a las plantas. Los fertilizantes líquidos son más fáciles de transportar, almacenar y distribuir en el campo, y se adaptan perfectamente a los sistemas de aplicación de riego, principalmente los de aspersion y goteo (Casanova et al., 2015).

El uso de fertilizantes líquidos y la fertirrigación tiene gran importancia desde el punto de vista técnico y económico. En el aspecto técnico supone un gran avance en la tecnología agrícola, ya que su introducción en un sistema de producción requiere del mejoramiento general de la capacitación técnica del agricultor, que va más allá de los aspectos específicos de la fertilización y del riego. Por otro lado, la importancia económica radica en los beneficios que brinda la fertirrigación en el incremento de los rendimientos y la calidad de las cosechas, que se traduce en mayores ingresos para el agricultor (E. R. Díaz & Guzmán, 2014).

### **1.9. Riesgos derivados del uso de los fertilizantes químicos.**

Oliveira (2017), manifiesta que conocer los factores de riesgo y su importancia permite adoptar las medidas preventivas de forma eficaz para disminuir la magnitud del mismo. En el caso del riesgo para la salud por la exposición a productos fertilizantes, dado que depende de múltiples factores, para facilitar su análisis con vistas a la prevención, se pueden clasificar en cuatro grupos (Castillo, 2017):

- Factores de riesgo que aporta el agente químico: son propiedades intrínsecas del agente, como la facilidad de la sustancia para ser absorbida por el organismo a través de las diferentes vías de entrada y su capacidad para producir daños.
- Factores de riesgo que aportan las condiciones del puesto de trabajo: son los que condicionan el contacto entre el agente y el individuo por causas no atribuibles a éste, como la difusión del agente en el aire, el tipo de manipulación y proceso laboral, los movimientos y distanciamiento relativos entre el individuo y los focos de generación, la frecuencia de contacto dérmico, la temperatura, etc.
- Características individuales o personales del trabajador: entre las que se incluyen edad, sexo, sus peculiaridades orgánicas o funcionales, ya sean temporales o crónicas, que puedan propiciar una mayor susceptibilidad para sufrir daños.
- Factores de riesgo que aporta el comportamiento del individuo: hábitos personales durante el trabajo, como fumar mientras se manipulan los productos, o la propia higiene personal.

### **1.9.1. Impactos ambientales potenciales en la industria de los fertilizantes.**

Entre los procesos ambientalmente negativos más importantes relacionados con el uso inadecuado de fertilizantes se encuentran la acumulación de nitratos en aguas subterráneas, la pérdida de óxidos de nitrógeno a la atmósfera y la contaminación de lagunas y ríos con fosfatos (Grasso & Díaz-Zorita, 2018). Estos problemas pueden ser causados, al utilizar un tipo de fertilizante inadecuado para el lugar, al aplicarlos fuera de los momentos convenientes o de consumo por las plantas, al agregar dosis muy elevadas, cuando son incorporados en una profundidad incorrecta, etc. (Rosendi, 2017).

- Contaminación atmosférica.

Los contaminantes atmosféricos contienen partículas provenientes de las calderas, trituradores de piedra de fosfato, flúor (el contaminante atmosférico principal que se originan en las plantas de fosfato), neblina ácida, amoníaco y óxidos de azufre y nitrógeno.

- Generación de residuos sólidos.

Los desechos sólidos que se producen durante la fabricación de fertilizantes, son muy complejos, y estos no pueden ser arrojados, indiscriminadamente, en el suelo. Los

materiales potencialmente peligrosos contienen: catalizadores usados de vanadio, provenientes de las plantas de ácido sulfúrico, y lodos de arsénico, de las fábricas de ácido sulfúrico que utilizan piritas; requieren un manejo y eliminación especial. Si el yeso está contaminado con metales tóxicos, puede ser difícil eliminarlo. La eliminación de la ceniza de las plantas de amoníaco que utilizan gasificación de carbón puede ser un problema. El área de terreno debe ser suficiente para poder almacenar adecuadamente los desperdicios sólidos. Existen oportunidades para reutilizar estos desechos sólidos y éstas deben ser evaluadas para cada proyecto.

- Contaminación de las aguas.

Las aguas servidas constituyen un problema fundamental. Pueden ser muy ácidas o alcalinas y, dependiendo del tipo de planta, pueden contener algunas sustancias tóxicas para los organismos acuáticos, si las concentraciones son altas: amoníaco o los compuestos de amonio, urea de las plantas de nitrógeno, cadmio, arsénico y flúor de las operaciones de fosfato, si está presente como impureza en la piedra de fosfato. Además, es común encontrar en los efluentes, sólidos totales suspendidos, nitrato y nitrógeno orgánico, fósforo, potasio, y, como resultado, mucha demanda de oxígeno bioquímico (DOB<sub>5</sub>); y, con la excepción de la demanda de oxígeno bioquímico, estos contaminantes ocurren también en las aguas de lluvias que escurren de las áreas de almacenamiento de los materiales y desechos.

Los desechos líquidos se originan en los procesos, torres de enfriamiento y purgación de las calderas, causando derrames, fugas y escurrimiento. Sin embargo, existe la oportunidad de reutilizar estas aguas dentro de las plantas, y reducir las demandas de la planta sobre las existencias locales.



## **CAPÍTULO II: METODOLOGÍA UTILIZADA PARA ELABORAR LA PROPUESTA DE TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTES LÍQUIDOS NPK EN LA EMPRESA QUÍMICA DE CIENFUEGOS (EQUIFA).**

En este capítulo se caracteriza el objeto de estudio de la investigación y se presenta la metodología utilizada en este trabajo, la cual consiste en el desarrollo de un “diagrama heurístico”. Se realiza la caracterización de la Empresa Química de Cienfuegos (EQUIFA), teniendo en cuenta los productos que allí se fabrican. Se explica la tecnología a implementar para la obtención de nuevos productos “fertilizantes líquidos NPK”, según metodología propuesta por (Rosendi, 2017) teniendo en cuenta una serie de observaciones.

### **2.1. Caracterización de la Empresa Química de Cienfuegos (EQUIFA).**

La Empresa Química de Cienfuegos ubicada en la Zona Industrial No. 2 O’ Bourke, Provincia Cienfuegos, Municipio Cienfuegos. Cuba. La misma fue creada el 27 de abril del 2005, mediante la resolución No. 2 124 del Ministerio de Economía y Planificación, integrada al Grupo Empresarial de la Industria Química y subordinada al Ministerio de Industrias.

#### **2.1.1. Estrategia empresarial de la empresa.**

En la Planeación Estratégica de la Empresa Química de Cienfuegos, para el período 2018–2021 está definida la misión, visión, los valores y los objetivos estratégicos a alcanzar por la organización.

##### Misión:

Satisfacer de manera sustentable las necesidades de crecimiento en el sector agrícola del país con la producción de fertilizantes granulados del tipo NPK para mejorar el rendimiento de la tierra y su rentabilidad. Minimizar los impactos ambientales negativos a través del manejo y disposición final de los desechos peligrosos. Proporcionar al sector de la Salud Pública reactivos químicos y dispensariales de acuerdo a requerimientos y especificaciones de comercialización. Proveer al Comercio Mayorista productos de aseo, higiene y limpieza.

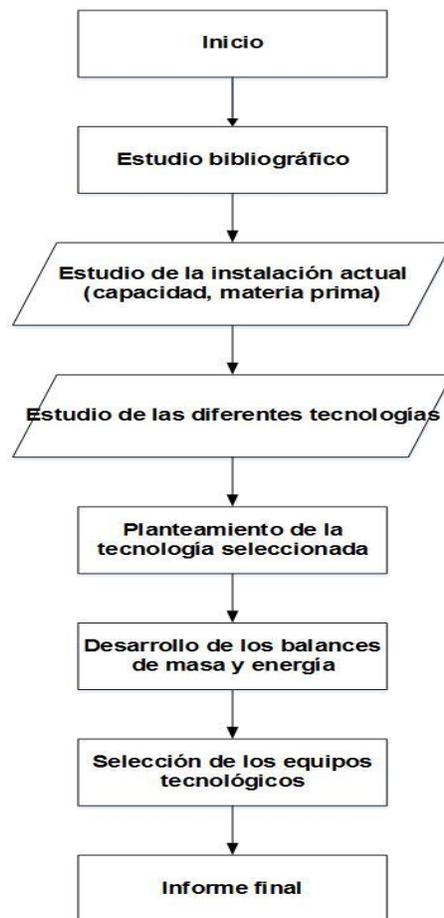
##### Visión:

Alcanzar el liderazgo nacional en la realización de nuestras producciones y prestaciones de servicios, así como lograr la competitividad nacionalmente, mediante la formación integral y continua de sus especialistas, el desarrollo de la actividad científico-técnica, la experiencia

acumulada en un clima laboral participativo y de mutuo compromiso, donde la mejora empresarial concilie tanto los objetivos económicos como la realización de las personas.

## 2.2. Método utilizado.

Como disciplina científica, la heurística es aplicable a cualquier ciencia e incluye la elaboración de medios auxiliares, principios, reglas, estrategias y programas que faciliten la búsqueda de vías de solución a problemas. En el presente trabajo se desarrolló el método de “diagrama heurístico”, pues es una herramienta muy empleada en el proceso de ayuda y búsqueda de los medios para resolver los problemas.



**Figura 2.1.** Diagrama heurístico de la metodología propuesta.

## 2.3. Descripción del proceso de producción de fertilizantes granulados NPK en la Empresa Química de Cienfuegos (EQUIFA).

Primeramente, el material entra en la planta por camión o vagones según la disponibilidad de una u otra forma de transporte. Las materias primas se descargarán en el almacén de consumo diario,

donde se ubicarán individualmente en depósitos denominados beis. Desde este punto, un equipo de carga, con capacidad de 2,5 t, transportará cada materia prima a la tolva de descarga (100HP1) provista con indicador de alto y bajo nivel (100HLI1/100LLI7), que informará mediante una señal de luz las condiciones de llenado del equipo. Solamente dos cargas del equipo suministrador (cargador frontal) serán alimentadas después de la indicación de bajo nivel de cualquier material. La malla ubicada en la parte superior de la tolva de descarga tiene el objetivo de evitar la entrada de material de mayor granulometría, a la especificada, en el sistema. La compuerta de corte neumática (100PCG1) permite la salida del producto al alimentador (100WF1), el cual está provisto de un sistema de pesas para regular/controlar la alimentación de las materias primas. El transportador de cinta (100BC1) y elevador de cangilones de tipo de cadena (100BE1), con velocidades de 0,5 m/s a 0,6 m/s aproximadamente, se utilizan para transportar el material a la tolva de múltiples compartimientos (100HP2). La tolva multi-compartimiento es una combinación de seis tolvas y en ellas se almacenarán las materias primas de forma independiente. Las mismas están equipadas con indicadores de alto (100HLI 2-7) y bajo nivel (100LLI 1-6) con el mismo principio de funcionamiento explicado para la tolva de descarga (100HP1). Cuando alguna de las tolvas del multi-compartimiento indique bajo nivel, entonces el mismo material deberá ser alimentado a la tolva de descarga (100HP1) por el cargador frontal. Existen 13 formulaciones diferentes que demandan 13 procesos diferentes.

En la siguiente tabla se hace alusión a las principales materias primas que son empleadas por la empresa para la formulación de la producción de fertilizantes mezclados NPK, los cuales requieren de la utilización de materiales fertilizantes simples, compuestos o la combinación de ambos como materias primas.

El diagrama de flujo del proceso se muestra en el Anexo 1.

**Tabla 2.1.** Materiales fertilizantes más empleados para la producción de fertilizantes granulados NPK.

<b>Tipo</b>	<b>Material Fertilizante</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Abreviatura comercial</b>
Nitrogenados	Sulfato de Amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	SAM
	Urea	$\text{CO}(\text{NH}_2)$	
	Nitrato de Amonio	$\text{NH}_4\text{NO}_3$	
	Fosfato monoamónico	$(\text{NH}_4)\text{HPO}_3$	MAP

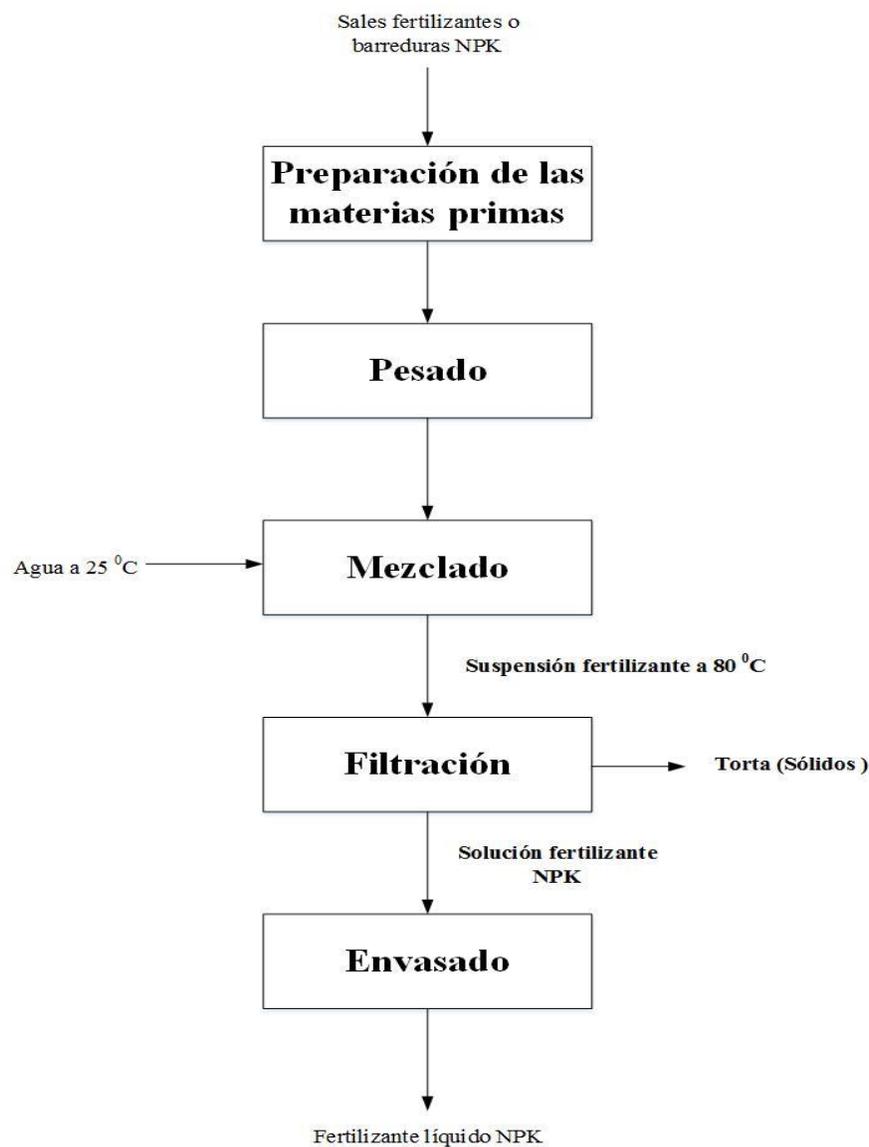
Fosfatados	Fosfato diamónico	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	DAP
	Superfosfato simple	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)+\text{CaSO}_4$	SSP
	Superfosfato triple	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)+\text{H}_2\text{O}$	STP
Potásicos	Cloruro de potasio	KCl	MOP
	Sulfato de potasio	$\text{K}_2\text{SO}_4$	SOP
Magnésicos	Sulfato de magnesio	$\text{Mg}_2\text{SO}_4$	-

#### 2.4. Descripción del proceso tecnológico para la producción de fertilizantes NPK líquidos.

El proceso comienza con el pesado de las materias prima sólidas (sales fertilizantes), mediante el empleo de una báscula digital. La cantidad de las mismas estará de acuerdo a la fórmula que se desee producir. Una vez pesadas son transportadas al área de producción mediante una grúa viajera (polipasto), la cual tendrá acoplada un depósito donde previamente son depositadas cada una de ellas, de manera independiente, para ser alimentadas hacia los tanques de mezclado, contando en ese momento los mezcladores con el agua requerida por la formulación, siendo esta previamente calentada por las resistencias eléctricas de inmersión que tienen instaladas los mezcladores hasta una temperatura de 80 °C. Depositadas todas las sales involucradas en el proceso en cada mezclador, comienza la operación mediante agitación mecánica, contando cada equipo con un agitador mecánico tipo paletas.

Transcurrido el tiempo de mezclado, el producto resultante (suspensión fertilizante) es bombeado hacia el filtro al vacío, para de esta manera filtrar dicha la suspensión, la cual puede llegar a presentar hasta un 5 % en peso de sólidos en suspensión, obteniéndose un líquido claro (filtrado) por el fondo del equipo y el sólido (torta) por el tope del mismo.

Seguidamente, la solución filtrada (solución fertilizante) es bombeada hacia los tanques de retención del batch mediante bombas centrífugas para su posterior envasado, etiquetado y embalado, para luego ser enviado hacia el almacén de producción terminada para su posterior comercialización. Ver Anexo 2.



**Figura 2.2.** Etapas del proceso de producción de fertilizantes líquidos NPK.

### 2.4.1. Materias primas empleadas en el proceso.

Como se explicó en el capítulo anterior, para el desarrollo de la industria de los fertilizantes generalmente se utilizan varias materias primas las cuales son portadoras de los tres nutrientes primarios, procedimiento que se lleva a cabo también en la fabricación de fertilizantes granulados. A continuación, se muestra la Tabla 2.2, donde aparecen las principales materias primas a emplear en la propuesta tecnológica, además de sus principales características.

**Tabla 2.2.** Materias primas propuestas a emplear en la producción de las diferentes formulaciones de fertilizantes líquidos NPK.

<b>Producto</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Composición química (% peso)</b>
Fosfato Diamónico (DAP)	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	18 % nitrógeno 46 % $\text{P}_2\text{O}_5$
Urea	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	46 % nitrógeno
Nitrato de Amonio	$\text{NH}_4\text{NO}_3$	
Sulfato de Amonio (SAM)	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	
Cloruro de potasio (MOP)	$\text{KCl}$	60 % $\text{K}_2\text{O}$

#### **2.4.2 Descripción de las principales etapas del proceso tecnológico.**

##### Etapas de Mezclado. Descripción de la operación.

La operación de mezclado es una etapa física dentro del proceso tecnológico, la misma consiste en lograr la dilución de las sales fertilizantes empleadas como materias primas. Por la característica que de manera general presentan estas sales de un comportamiento endotérmico en el proceso de dilución, provocando la absorción de calor del medio, lo cual genera un enfriamiento de la mezcla, se plantea la necesidad de calentar el agua utilizada en la formulación del producto en el propio equipo hasta una temperatura de 80 °C.

##### Etapas de Filtración. Descripción de la operación.

La operación de filtración es considerada como una etapa física dentro del proceso tecnológico, cuya operación consiste en lograr la separación de los sólidos suspendidos con que cuenta la suspensión fertilizante resultante de la etapa de mezclado. La presencia de estos sólidos en dicha corriente del proceso, está dada, fundamentalmente, a la presencia de sustancias no deseadas (impurezas) que forman parte de la composición química de las materias primas utilizadas en el proceso, pudiendo alcanzar valores de hasta un 5 % en peso de sólidos en la suspensión (Rodríguez et al., 2014).

### 2.4.3 Nivel de operación estimado.

Para la estimación de los niveles de producción esperados que se plantean para el esquema tecnológico propuesto, se comienza a partir de la estimación de la capacidad de producción para la cual se pretende realizar la propuesta.

La capacidad de producción diaria está determinada por la cantidad de plantas posibles a producir en el tiempo de trabajo diario, estimando trabajar diariamente un turno de 8 horas, de lunes a viernes, por las características del proceso, que consume varias horas en el proceso de dilución no se considera descontar tiempos de preparación de condiciones, tiempo de almuerzo y merienda ni otro tipo de tiempo, se considera como tiempo de producción las 8 horas netas.

Partiendo de la capacidad de producción estimada, se realiza la propuesta tanto del número de equipos, así como de su capacidad de producción, y las características de su funcionamiento.

### 2.5. Desarrollo de los Balances de Masa y Energía.

A continuación, se plantean los balances de masa y energía correspondientes a cada una de las etapas del proceso, para lo cual se presenta la siguiente figura, que representa el diagrama de bloque del proceso tecnológico:



Figura 2.3. Diagrama de bloque del proceso tecnológico.

Para el desarrollo de los balances de materia que tienen lugar en el proceso de producción de fertilizantes NPK líquidos, se parte de un ejemplo de formulación, ya que, al tratarse de simples mezclas físicas con agua, existen millones de formulaciones diferentes.

Para ello tomamos como referencia el fertilizante NPK 12 - 4 - 6. Las materias primas utilizadas son: Urea,  $H_3PO_4$ , KCl y  $H_2O$ .

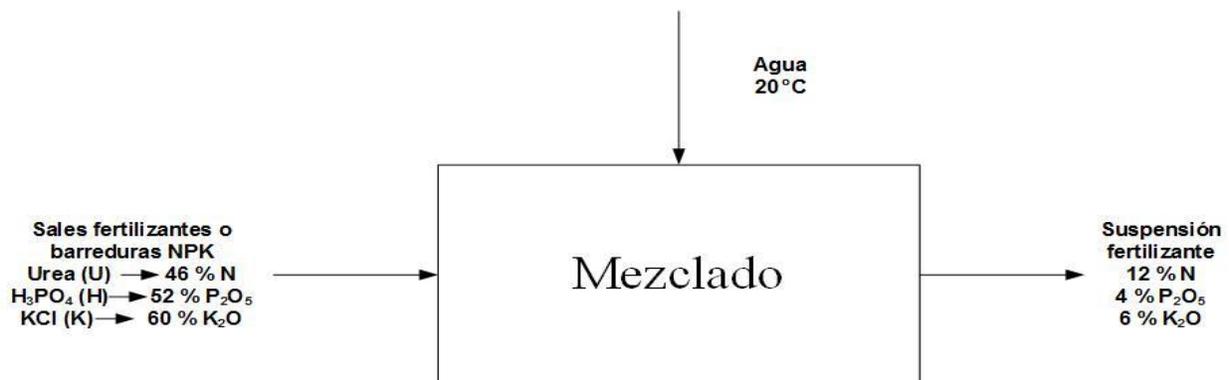
Para mejorar el entendimiento del proceso, a cada una de las corrientes del proceso se les da la siguiente denominación, como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 2.3.** Denominación establecida para las corrientes del proceso en la etapa de mezclado.

Corriente	Denominación
Urea	U
$H_3PO_4$	P
KCl	K
Agua	A
Suspensión fertilizante	S

### 2.5.1. Balance en la etapa de Mezclado.

Para el desarrollo del balance de materiales de la etapa de mezclado primeramente se procede a tomar la base de cálculo para la producción de la formulación escogida, y conociendo la densidad de la suspensión fertilizante, se procede al planteamiento y la explicación del balance de materiales, para ello nos auxiliamos de la siguiente figura:



**Figura 2.4.** Diagrama de bloque de la operación de mezclado.

El balance total para la etapa de mezclado queda planteado de la siguiente manera:

$$U + P + K + A = S \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Partiendo del balance total, se procede a plantear el balance parcial para cada uno de los compuestos principales, el nitrógeno (N), el óxido de fósforo (V) ( $P_2O_5$ ) y el óxido de potasio ( $K_2O$ ).

Balance Parcial del Nitrógeno (N):

Para el desarrollo del balance parcial del nitrógeno se toma como nomenclatura  $X_{Nit.}$ , siendo esta la concentración de nitrógeno en cada una de las corrientes del proceso; por tanto, queda planteado de la siguiente forma:

$$U * X_{Nit.} (U) = S * X_{Nit.} (S), \quad \text{Ecuación 2.2}$$

despejando de la ecuación se obtendrá el valor de urea que se obtiene en la corriente de salida del mezclador;

$$U = \frac{S * X_{Nit.} (S)}{X_{Nit.} (U)} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Balance Parcial del Oxido de Fósforo (V) ( $P_2O_5$ ):

Siendo  $X_{P_2O_5}$  la concentración de fósforo en forma de Pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) en cada una de las corrientes del proceso, el balance parcial queda planteado de la siguiente manera:

$$H * X_{P_2O_5}(H) = S * X_{P_2O_5}(S), \quad \text{Ecuación 2.4}$$

y para obtener el valor de la corriente de salida se plantea por el siguiente despeje;

$$H = \frac{S * X_{P_2O_5}(S)}{X_{P_2O_5}(H)} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Balance Parcial de Óxido de Potasio ( $K_2O$ ):

La concentración de potasio expresado como óxido de potasio ( $K_2O$ ) se ve como  $X_{K_2O}$  en cada una de las corrientes del proceso.

$$K * X_{K_2O}(K) = S * X_{K_2O}(S), \quad \text{Ecuación 2.6}$$

de igual forma que con los otros dos compuestos que conforman la formulación escogida, se despeja y una ecuación que da como resultado el valor del óxido de potasio en la corriente de salida;

$$K = \frac{S * X_{K_2O}(S)}{X_{K_2O}(K)} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Después de haber obtenido los valores de cada una de las corrientes de salida correspondientes a los compuestos principales, se procede a plantear el despeje del balance total de la etapa para así poder calcular la cantidad de agua necesaria para la operación de mezclado;

$$A = S - U - P - K \quad \text{Ecuación 2.8}$$

### 2.5.1.1 Balance de Energía

Para la operación de mezclado, se hace necesario calentar el agua que se utiliza para realizar las diferentes formulaciones desde una temperatura de 25 °C hasta la temperatura de 80 °C. Por esto, se plantea el balance de energía que tiene como objetivo determinar la cantidad de calor que se requiere para calentar el agua hasta dicha temperatura.

$$Q_g = \Delta H_{\text{agua}} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$\Delta H_{\text{agua}} = m_{\text{agua}} * C_{p_{\text{agua}}} * (T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 2.9.1}$$

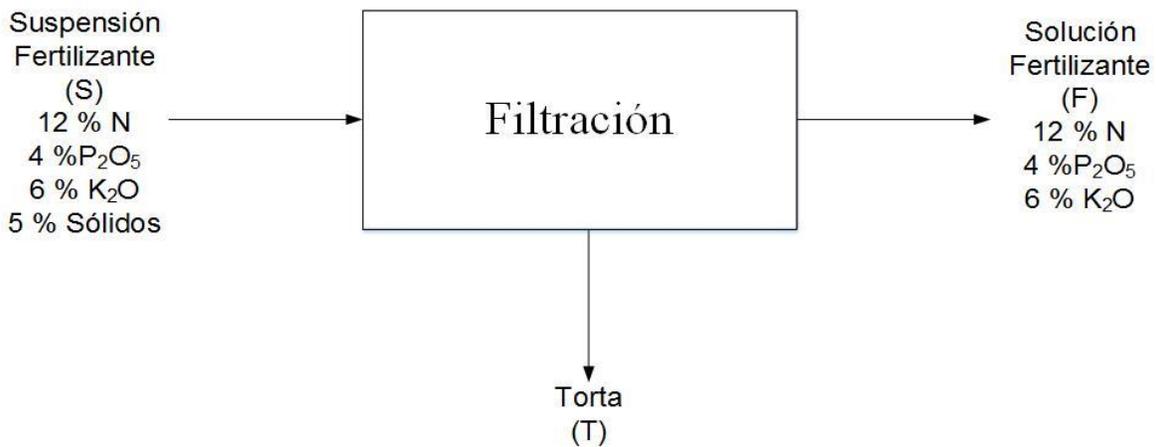
Se parte de considerar el  $C_{p_{\text{agua}}}$  constante y de conocer los siguientes datos:

$$m_{\text{agua}} = 1\,242 \text{ kg}$$

$$C_{p_{\text{agua}}} = 1 \text{ kcal / kg} * ^\circ\text{C}$$

### 2.5.2. Balance en la etapa de Filtración.

Para el desarrollo del balance de materiales, se considera que la eficiencia en la etapa de filtración es del 100 %, por tanto, se separa todo el sólido contenido en la suspensión fertilizante. Seguidamente, nos auxiliamos de la siguiente figura para representar las corrientes de entrada y salida de la misma;



**Figura 2.5.** Diagrama de bloque de la etapa de Filtración.

En base al diagrama de bloque, el balance total para la etapa queda planteado de la siguiente forma:

$$S = F + T \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Luego de planteado el balance total de la etapa, se plantea el balance parcial de sólidos ( $X_s$ ) de la siguiente forma:

$$S * X_s(S) = F * X_s(F) + T * X_s(T), \quad \text{Ecuación 2.11}$$

donde por los explicado anteriormente se plantea que;

$$X_s(F) = 0 \text{ y } X_s(T) = 1,$$

de ahí que el balance parcial de reduce a;

$$S * X_s (S) = T * X_s (T), \quad \text{Ecuación 2.11.1}$$

Despejando de dicha ecuación obtenemos el valor de la torta que se obtiene de la etapa de filtración;

$$T = \frac{S * X_s (S)}{X_s (T)} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Después de obtenido el valor de la torta, se sustituye su valor en el despeje de la ecuación del balance total y así se obtendrá el valor de la corriente de salida F (de la solución fertilizante):

$$F = S - T \quad \text{Ecuación 2.10.1}$$

## 2.6. Sistemas de bombeo de la instalación.

### 2.6.1 Sistema A. Sistema de bombeo de los mezcladores hacia los filtros.

Como se explicó anteriormente, después de lograda la dilución de las sales fertilizantes en los tanques de mezclado, la suspensión resultante es bombeada hacia el filtro para su filtración. Ver Anexo 3.

Para desarrollar el cálculo del balance de Energía Mecánica, se comienza partiendo de la Ecuación de Bernoulli (Rosabal & Garcell, 2010):

$$\frac{V_1^2}{2 * g} + \frac{P_1}{\rho * g} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2 * g} + \frac{P_2}{\rho * g} + Z_2 + h_p \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Donde:

$V^2/2 * g$ , carga de velocidad;

$P/\rho * g$ , carga piezométrica;

Z, altura o carga geométrica;

$h_p$ , pérdidas de carga.

También se tiene H, la carga hidrodinámica:

$$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho * g} + \frac{\Delta V^2}{2 * g} + h_p \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Para el desarrollo del cálculo del balance de energía mecánica se necesitan conocer datos del producto a bombear, que en este caso sería la suspensión fertilizante, estos datos son;

- Densidad ( $\rho$ ).
- Viscosidad ( $\mu$ ).
- % sólidos.
- Volumen.

Para poder determinar la carga hidrodinámica, hay que primeramente determinar los elementos que componen la ecuación:

Cálculo de  $\Delta Z$ :

El cálculo de  $\Delta Z$  se realiza por la siguiente ecuación:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 \quad \text{Ecuación 2.14.1}$$

Cálculo de  $\Delta P$ :

Para el cálculo de  $\Delta P$  se toma como referencia los puntos 1 y 2, tomando como consideración que en los dos puntos la presión es atmosférica por encontrarse ambos equipos abiertos al ambiente, por tanto, según:

$$\frac{\Delta P}{\rho * g} = 0 \quad \text{Ecuación 2.14.2}$$

Cálculo de  $\Delta V^2/2 * g$ :

Considerando que entre los puntos 1 y 2 la variación de velocidades de flujo es despreciable, se tiene que:

$$\frac{\Delta V^2}{2 * g} = 0 \quad \text{Ecuación 2.14.3}$$

Cálculo de las pérdidas de carga  $hp$ :

Para el cálculo de las pérdidas de cargas se parte de la siguiente ecuación, de la cual se derivan otras ecuaciones que se muestran seguidas de ésta:

$$hp = hp_t + hp_{acc} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

$$hp_t = f * \frac{L * V^2}{2 * g * D} \quad \text{Ecuación 2.15.1}$$

$$hp_{acc} = \frac{\sum Ki * V^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación 2.15.2}$$

Donde,

$h_{p_i}$  son las pérdidas por fricción;

$H_{p_{acc}}$  son las pérdidas locales;

$f$  es el factor de fricción;

$\sum K_i$  son los coeficientes de resistencias hidráulicas de las válvulas, accesorios, entre otros.

Cálculo de  $h_{p_i}$ :

$$f = f\left(\frac{e}{D}, Re\right), \quad \text{Ecuación 2.15.1.1}$$

para poder determinar  $f$ , el factor de fricción, hay que seguir una serie de pasos:

1- Determinación del número de Reynolds ( $Re$ ), a partir de la siguiente ecuación (Perry, Green, & Maloney, 2008):

$$Re = \frac{D * V * \rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Donde:

$D$ , diámetro de la tubería, m.

$V$ , velocidad del fluido, m/s.

$\rho$ , densidad,  $kg/m^3$ .

$M$ , viscosidad,  $Pa * s$ .

2- Velocidad del fluido ( $v$ ).

$$V = \frac{Q}{A}, \text{ donde:} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

$Q$ , flujo volumétrico,  $m^3/s$ .

$A$ , área de la tubería,  $m^2$ .

3- Flujo volumétrico ( $Q$ ).

Como especificación del proceso, se tiene que el tiempo de vaciado de cada uno de los mezcladores debe ser de 20 min. Conociendo el valor del volumen de suspensión a bombear, se puede calcular el flujo volumétrico por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

Para la continuación de los cálculos se necesitan conocer datos de la tubería:

Material:

L (Longitud):

D (Diámetro):

E (rugosidad):

Seguidamente de conocer los datos de tubería se calcula el área por la ecuación que se muestra a continuación:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Con el valor del área se puede obtener el valor del volumen mediante la ecuación 2.17.

Con todos los parámetros obtenidos, se procede a determinar el valor del Re utilizando la ecuación 2.16.

Luego del cálculo de Re, se pasa a determinar el valor de factor de fricción (f) basándonos en la figura 6.9 del (Perry et al., 2008).

Después de obtenidos los valores de L, V, D y f, se procede al cálculo de las pérdidas por fricción utilizando la ecuación 2.15.1.

Luego, para proceder al cálculo de las pérdidas locales  $h_{p_{acc}}$ , primero se necesitan recopilar una serie de datos, los cuales se ven representados en la tabla que se muestra a continuación:

**Tabla 2.4.** Datos obtenidos para el cálculo de las pérdidas locales.

$\sum K$ (accesorios)	Cantidad	K	
Codos de 90° estándar	3	0,75	2,25
Válvula de globo ½ abierta	1	9	9
Salida a un depósito de gran volumen	1	1	1
			12,3

Fuente. (Rosabal & Garcell, 2010).

Después de tener todos los elementos necesarios se procede al cálculo de las pérdidas de carga mediante la ecuación 2.15.

Seguidamente se calcula la carga H empleando la ecuación 2.14.

#### Cálculo de la potencia de la bomba N:

Para realizar el cálculo de la potencia de la bomba nos basamos en la siguiente ecuación de (Perry et al., 2008):

$$N = \frac{H*Q*\rho}{3,670 * 10^5 * \mu}$$

Ecuación 2.20

Partiendo del resultado obtenido del cálculo de la potencia, y tomando en cuenta la reserva para las posibles sobrecargas, el motor se instala con una potencia mayor que la potencia consumida. El coeficiente de reserva  $\beta$ , se toma en dependencia de la magnitud del resultado de la potencia obtenida (Rosabal & Garcell, 2010). Lo anteriormente se ve expuesto en la siguiente tabla:

N	$\beta$
<1	2-1,5
1<N<5	1,5-1,2
5<N<50	1,2-1,15
N>50	1,1

### Selección de la bomba

Después de determinadas las principales características de la bomba, se procede a la selección de la misma y a la descripción de sus características principales.

#### **2.6.2. Sistema B. Sistema de bombeo del filtro al vacío hacia los tanques de almacenamiento.**

Como se mencionó en la explicación del proceso, una vez lograda la dilución de las sales fertilizantes en los tanques de mezclado y filtrada la suspensión fertilizante, la solución filtrada, obtenida a partir del proceso de instalación de una bomba de vacío, es bombeada hacia los tanques de almacenamiento para su posterior envasado. Ver Anexo 4.

Para dimensionar la bomba que transporta la solución fertilizante hacia los tanques de almacenamiento de producto terminado, se sigue la misma metodología que se presentó para el sistema A.

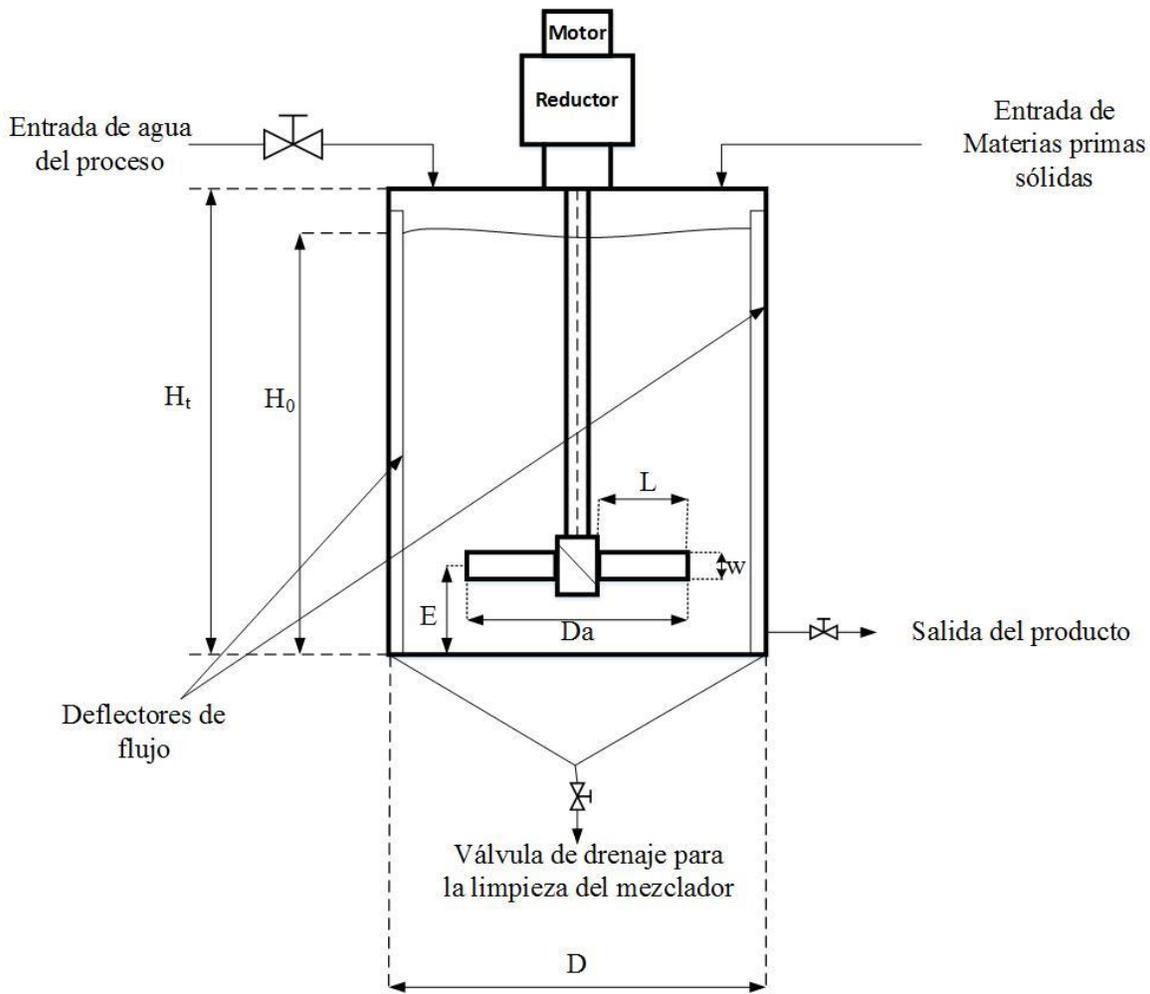
Para el desarrollo del Balance de Energía Mecánica, se comienza por la Ecuación de Bernoulli, que sería la ecuación 2.13, que quedó planteado anteriormente.

Seguidamente se realizan los cálculos correspondientes con la metodología que ya fue explicada, que van desde la ecuación 2.13 hasta la ecuación 2.20, desarrollando los cálculos con los datos correspondientes a esta sección, concluyendo con la selección de la bomba y sus características técnicas.

## 2.7. Dimensionamiento de los equipos tecnológicos.

### 2.7.1. Etapa de mezclado.

La etapa de mezclado de la propuesta tecnológica está compuesta por dos recipientes del tipo tanque agitado. Para este tipo de equipo, los parámetros fundamentales de diseño son el diámetro (D) y la altura (H). Según Perry et al. (2008), los recipientes cilíndricos cuando tienen sistema de agitación incluido, se diseñan de manera que la altura del nivel del líquido sea igual a su diámetro. Cuando no ocurre agitación, se utiliza mayor altura con el fin de ocupar menor área en la planta.



**Figura 2.6.** Propuesta de diseño de los mezcladores. Fuente. Elaboración propia.

Para el desarrollo del diseño de los equipos de mezclado que conforman la sección A del proceso, se procede con la explicación de uno de ellos, debido a que ambos equipos son iguales, para ello se consideran las siguientes relaciones de diseño (McCabe, Smith, & Harriott, 1991):

$$D_a/D = 1/3$$

$$D/H_0 = 1$$

$$J/D = 1/12$$

$$E/D_a = 1$$

$$W/D_a = 1/5$$

$$L/D_a = 1/4$$

Donde:

D: Diámetro del recipiente.

D<sub>a</sub>: Diámetro del agitador.

J: Ancho de los deflectores de flujo (Baffles).

E: Distancia del agitador fondo del tanque.

W: Ancho de las paletas agitador.

L: Largo de las paletas del agitador.

H<sub>0</sub>: Altura de líquido en el tanque.

Como se explicó anteriormente, el volumen de la suspensión en los mezcladores es de 1,5 m<sup>3</sup>, que sería el volumen efectivo, (V<sub>e</sub>). Partiendo de esto tenemos:

$$V_e = \frac{\pi * H_0 * D^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Considerando que H<sub>0</sub> = D;

$$V_e = \frac{\pi * D^3}{4} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

De la ecuación anterior se despeja y se obtiene el valor de D, y, por tanto, H<sub>0</sub>.

Tomando en consideración un sobrediseño de la altura del tanque mezclador de un 10 %, según (Peter & Timmeraus, 1991) tenemos que la altura total de los mezcladores será:

$$H_t = H_0 + H_0 * 10 \% \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Después del cálculo de sobrediseño, podemos determinar el volumen total de los recipientes mezcladores por la siguiente fórmula:

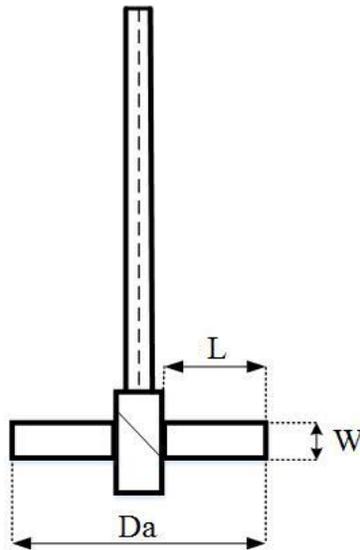
$$V_c = \frac{\pi * D^2 * H_c}{4} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

### 2.7.1.1. Dimensionamiento del agitador.

La mayoría de las operaciones de agitación a escala industrial para operaciones de dilución se realizan con agitadores de paletas que se introducen por la parte superior del recipiente. Perry et al. (2008), indica que la velocidad del impulsor en revoluciones por minuto (rpm) suele ser de entre 50 rpm y 150 rpm, aunque, según las condiciones del proceso, puede llegar hasta 400 rpm o a sólo 15 rpm.

Rosendi (2017), detalla que los agitadores de paleta son dispositivos que están compuestos por dos o más paletas de sección rectangular acopladas a un árbol vertical o inclinado. Con el fin de obtener un fuerte flujo axial para la suspensión de sólidos también se utilizan turbinas con una inclinación de las placas de 45°. Las ventajas principales de los agitadores de paletas son la sencillez de su estructura y el bajo costo de fabricación.

A continuación, se muestra una propuesta de agitador de paletas:



**Figura 2.7.** Agitador de paletas propuesto. Fuente. Elaboración propia.

De la bibliografía se conoce que;

$$D_a/D = 1/3$$

$$L/D_a = 1/4$$

$$W/D_a = 1/5$$

$$E/D_a = 1$$

De ahí que se pueden determinar las principales dimensiones del agitador, L, W, Da y E.

### 2.7.1.2. Selección de las resistencias eléctricas para el calentamiento del agua.

Para la propuesta tecnológica se prevé la instalación de resistencias eléctricas de inmersión como medio de calentamiento, las cuales tienen gran aplicación en diversos procesos industriales que requieren de un calentamiento eléctrico de líquidos y gases (Rosendi, 2017).

Rodríguez et al. (2014), señala que mediante el calentamiento del agua de proceso, es posible disminuir el tiempo de dilución de las sales en 4 veces respecto a la utilización de agua a temperatura ambiente. Por lo que, mediante este calentamiento se disminuye el tiempo operacional total de la instalación, ya que, el tiempo de funcionamiento del sistema de agitación disminuye también.

Como anteriormente quedó planteado en el Balance de Energía, la cantidad de calor que se necesita para calentar el agua hasta la temperatura de 80 °C es de 68 310 kcal (79,3914 W).

Se procede al cálculo del área del tanque de mezclado, si se conoce que el diámetro  $D = 1,2$  m:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

De ahí se calcula la carga del sistema a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Carga} = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

Según Estarelles (2017), la temperatura debe ser mantenida en la operación de mezclado entre 60 °C y 80 °C, con el fin de lograr el máximo de eficiencia en la misma. Por lo mismo, se recomienda la instalación de un sistema de control automático de temperatura con el objetivo de optimizar el funcionamiento de las resistencias eléctricas, permitiendo esto, que estas no permanezcan encendidas innecesariamente trayendo consigo un consumo eléctrico innecesario.

### **2.7.2. Dimensionamiento del filtro al vacío.**

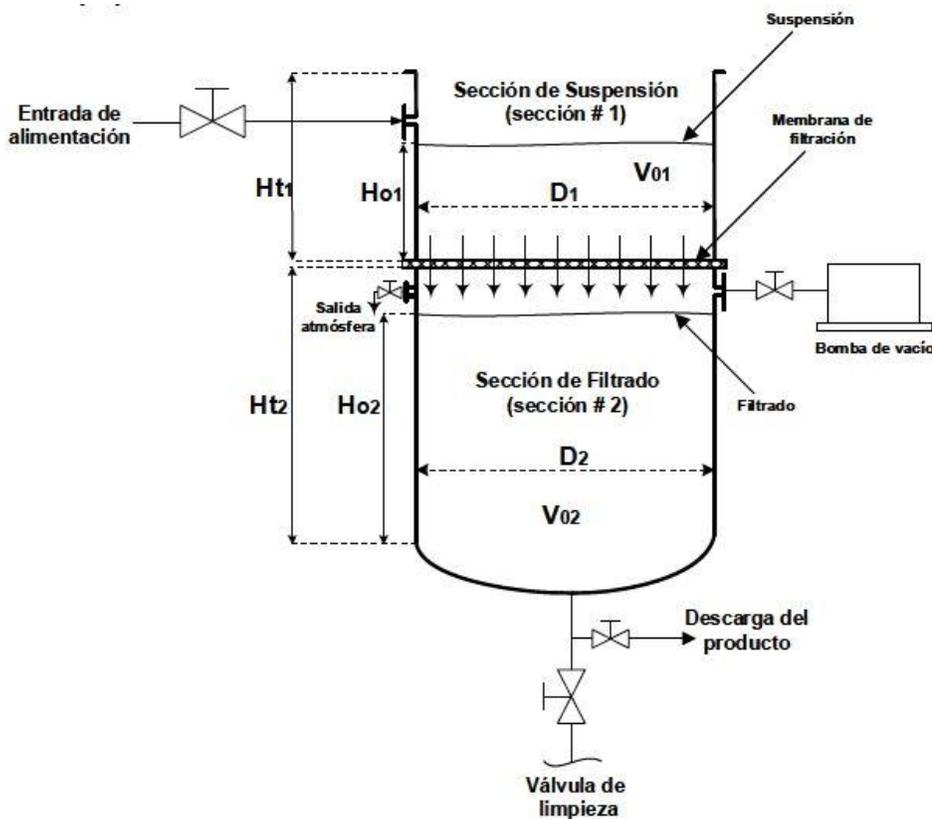
Para el dimensionamiento del filtro, se realiza la propuesta de un filtro del tipo Nutsche al vacío, el cual consiste en un recipiente de tipo cilíndrico vertical dividido en dos secciones.

Según (Perry et al., 2008), "nutsche" es la expresión alemana para succión y el vacío es la modalidad común de operación. Las dos secciones en las que se divide el filtro, se separan en la parte superior (sección 1) y la parte inferior (sección 2). En la parte superior, es donde ocurre el bombeo de la suspensión a filtrar, y en la parte inferior, es donde se produce el vacío, como resultado de lo cual la fase líquida de la suspensión pasa en forma de filtrado a través de la membrana de filtración (medio filtrante) y se evacúa en esta propia sección.

La fase sólida de la suspensión queda retenida en forma de sedimento sobre la membrana. La ventaja de este tipo de filtro consiste en su sencillez, mientras que su imperfección radica en la necesidad de descargar el sedimento manualmente.

El diseño de la mayor parte de los filtros nutsche es muy sencillo y, a menudo, los puede fabricar el usuario a bajo costo. Sin embargo, para el procesamiento a gran escala, el área excesiva de piso que involucra la unidad de filtración, y la dificultad para eliminar la torta son factores disuasivos. Para la operación a pequeña escala, la torta se puede eliminar manualmente. Para las aplicaciones a gran escala, la torta puede someterse a un procesamiento posterior por medio de su reprecipitación o redisolución, o bien, puede eliminarse manualmente (mediante una pala) o a través de dispositivos para su descarga mecánica que en ocasiones son complicados.

En la siguiente figura se representa un esquema en el que puede observarse el filtro anteriormente mencionado:



**Figura 2.8.** Esquema del filtro al vacío propuesto. Fuente. (Rosendi, 2017).

Donde:

$H_{o1}$ , altura del nivel de la suspensión en la sección #1 (altura de trabajo).

$H_{t1}$ , altura total de la sección #1.

$V_{01}$ , volumen que ocupa la suspensión en la sección #1 (volumen de trabajo).

$V_{t1}$ , volumen total de la sección #1.

$D_1$ , diámetro de la sección #1.

$H_{02}$ , altura del nivel filtrado en la sección #2 (altura de trabajo).

$H_{t2}$ , altura total de la sección #2.

$V_{02}$ , volumen que ocupa el filtrado en la sección #2 (volumen de trabajo).

$V_{t2}$ , volumen total de la sección #2.

$D_2$ , diámetro de la sección #2.

### 2.7.2.1. Dimensionamiento de la sección de filtrado (sección #2).

Para el dimensionamiento de la sección de filtrado se parte de la consideración que el volumen de trabajo de la sección sea igual al volumen de trabajo de un mezclador e igual a  $1,5 \text{ m}^3$ , sin considerar el volumen del fondo del recipiente.

Por tanto,

$V_{02} = 1,5 \text{ m}^3$  (sin considerar el volumen del fondo)

Considerando una relación  $D_2/H_{02} = 1$ , tenemos:

$$V_{02} = \pi * \frac{D_2^3}{4} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

Despejando D de la ecuación anterior obtenemos:

$$D_2 = \sqrt[3]{4 * \frac{V_{02}}{\pi}} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

Luego de obtenido el valor de  $D_2$ , se puede obtener el valor  $H_{02}$ .

Considerando una altura de sobrediseño  $H_{sd}$  de un 20 %, se calcula  $H_{t2}$  por la siguiente ecuación:

$$H_{t2} = H_{02} + H_{sd} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

Seguidamente se procede a obtener el volumen total de la sección:

$$V_{t2} = \pi * \frac{D_2^2}{4} * H_{t2} \quad \text{Ecuación 2.30}$$

### 2.7.2.2. Dimensionamiento de la sección de suspensión (sección #1).

Para proceder con el dimensionamiento de esta sección se realiza partiendo de la siguiente consideración:

$$\bullet V_{01} = \frac{1}{3} * V_{02}$$

Siendo  $V_{02} = 1,5 \text{ m}^3$

$$V_{01} = 1,5/3 = 0,5 \text{ m}^3$$

Como  $D_{01} = D_{02} = 1,2 \text{ m}$ , a partir de ahí se plantea la siguiente ecuación, con el objetivo de calcular  $H_{01}$ :

$$V_{01} = \pi * \frac{D_{01}^2}{4} * H_{01} \quad \text{Ecuación 2.31}$$

Considerando una altura de sobrediseño  $H_{sd}$  de un 20 %, se calcula  $H_{t1}$  por la siguiente ecuación:

$$H_{t1} = H_{01} + H_{sd} \quad \text{Ecuación 2.32}$$

Seguidamente se procede a obtener el volumen total de la sección:

$$V_{t1} = \pi * \frac{D_1^2}{4} * H_{t1} \quad \text{Ecuación 2.33}$$

### **2.7.2.3. Dimensionamiento del sistema al vacío.**

#### **2.7.2.3.1. Sección de suspensión.**

Para el desarrollo de los cálculos correspondientes al dimensionamiento de la bomba de vacío a emplear en la operación de filtración, se necesitan conocer los datos de la suspensión, como la densidad y  $H_{01}$ .

Partiendo de esto, se procede a determinar la presión que ejerce la suspensión en la sección # 1, debido a que dicha sección del filtro se encuentra abierto a la atmósfera, para ello se procede a partir de la siguiente ecuación;

$$P_1 = \rho * H_{01} \quad \text{Ecuación 2.34}$$

Siendo  $P_1$  la presión ejercida por la suspensión en esta sección del filtro, considerada como presión hidrostática.

#### **2.7.2.3.2 Sección de filtrado.**

Rosabal and Garcell (2010), señala que las diferencias de presión ( $\Delta P$ ) que se usan industrialmente en operaciones de filtración al vacío, son del orden de  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$  y  $0,9 \text{ kgf/cm}^2$ . Por tanto, considerando una  $\Delta P = 0,9 \text{ kgf/cm}^2$ ;

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad \text{Ecuación 2.35}$$

$$P_2 = P_1 - \Delta P \quad \text{Ecuación 2.35.1}$$

$$P_{2\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{man}} \quad \text{Ecuación 2.35.2}$$

Después de terminado el cálculo, se procede a la selección de la bomba de vacío y seguidamente se presentan sus características técnicas.

### **CAPÍTULO III. PRESENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.**

En este capítulo se presentan los resultados relacionados con los cálculos de balance de masa y de energía de la tecnología propuesta para la producción de fertilizantes líquidos NPK en la Empresa Química de Cienfuegos "EQUIFA". Además, se presentan las propuestas de diseño de algunos equipos y secciones del proceso tecnológico. Así como la identificación de los principales impactos ambientales que puedan ser provocados por la aplicación de la tecnología.

#### **3.1. Aplicación de la tecnología.**

La aplicación de la tecnología se realiza siguiendo en orden los pasos propuestos en el capítulo anterior por (Rosendi, 2017). Para el desarrollo de la misma se presentan los diseños y propuestas en cuanto a los equipos, sistemas tecnológicos, materias primas, balances de materiales y energía.

##### **3.1.1. Resultado de los niveles de operación estimado.**

Los niveles de producción esperados que se plantean para el esquema tecnológico propuesto son los siguientes:

- Se estima que la capacidad de producción es de  $7,2 \text{ t/día}$  lo que equivale a  $6 \text{ m}^3/\text{día}$ .

- Se proponen dos mezcladores de capacidad 1,5 m<sup>3</sup> de solución limpia cada uno, por lo que ambos mezcladores suman un total de 3,0 m<sup>3</sup> de capacidad, siendo la dilución el proceso limitante del sistema.
- La planta puede procesar con dos mezcladoras 4 templeas diarias de 1,5 m<sup>3</sup> cada una para un total diario de 6,0 m<sup>3</sup>.

Considerando los 365 días del año y que de ellos laborables son 221 días podemos determinar:

La capacidad instalada de la planta será:

$$6 \text{ m}^3 \times 365 \text{ días} = 2\,190 \text{ m}^3/\text{año}.$$

La capacidad disponible de la planta será:

$$6 \text{ m}^3 \times 221 \text{ días} = 1\,326 \text{ m}^3/\text{año}.$$

Considerando que la eficiencia industrial es del 85 %, la capacidad efectiva anual de la planta será:

$$1\,326,0 \text{ m}^3/\text{año} \times 0,85 = 1\,127,1 \text{ m}^3/\text{año}.$$

### 3.2. Resultado del balance de masa y energía.

Para la presentación del resultado de los balances de materia que tienen lugar en el proceso de producción de fertilizantes NPK líquidos, se parte de una formulación ejemplo que fue presentada en el capítulo anterior.

En la siguiente tabla se muestran los porcentos peso que poseen cada uno de los componentes del fertilizante seleccionado:

**Tabla 3.1.** Composición química de los compuestos que componen al fertilizante seleccionado.

<b>Producto</b>	<b>Composición química ( % peso)</b>
Urea	46% nitrógeno
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	52% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
KCl	60% K <sub>2</sub> O

Para la presentación de los balances del proceso se presenta la siguiente tabla con la finalidad de mejorar el entendimiento del proceso, en la cual se presentan las denominaciones dadas a las corrientes del proceso:

**Tabla 3.2.** Denominaciones de todas las corrientes del proceso.

Corriente	Denominación
Urea	U
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	P
KCl	K
Agua	A
Torta	T
Suspensión fertilizante	S
Solución fertilizante	F

### 3.2.1. Resultado del balance de masa en la etapa de Mezclado.

Para el desarrollo de los balances totales y parciales se toma como base de cálculo 1 batch de producción de la formulación 12 - 4 - 6 y conocida la densidad de la suspensión fertilizante igual a 1 200 kg/m<sup>3</sup>.

A partir de la ecuación 2.1 y de que se conoce que la capacidad de los mezcladores es de 1,5 m<sup>3</sup>, se puede plantear que:

$$S = 1,5 \text{ m}^3$$

multiplicando por la densidad de la solución se obtiene:

$$S = 1 800 \text{ kg}$$

El balance parcial de sólidos realizado para el Nitrógeno (N), para el Óxido de Fósforo (V) (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y para el Óxido de Potasio (K<sub>2</sub>O), fue desarrollado por las ecuaciones desde la 2.2 hasta la ecuación 2.7.

A partir del resultado obtenido de los balances parciales y totales del proceso, se puede determinar la cantidad de agua necesaria para la etapa, para ello se utiliza la ecuación 2.8.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del balance total y del balance parcial de sólidos realizados por las ecuaciones anteriormente mencionadas para la etapa de mezclado del proceso:

**Tabla 3.3.** Resultados obtenidos de los balances totales y parciales para la etapa de mezclado.

Corrientes	Resultados (kg)
Urea (U)	470

H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (H)	138,5
KCl (K)	180
Agua (A)	1 011,5
Suspensión fertilizante (S)	1 800

### 3.2.2. Resultado del balance de Energía.

Como se explicó en el capítulo anterior, para la operación de mezclado, se necesita calentar el agua desde una temperatura de 25 °C hasta la temperatura de 80 °C. Por lo tanto, se parte de las ecuaciones 2.9 y 2.9.1 y se obtiene como resultado:

$$Q_g = 68\,310 \text{ kcal}$$

$$Q_g = 285\,809,04 \text{ kJ}$$

### 3.2.3. Resultado del balance de masa en la etapa de Filtración.

Partiendo del balance total de la etapa de filtración, por la ecuación 2.10, y teniendo en cuenta que en la etapa de filtración se considera que la eficiencia es del 100 %, se procede al cálculo del balance parcial de sólidos, por las ecuaciones desde la 2.11 hasta la ecuación 2.12. En la siguiente tabla se muestran los resultados de los balances totales y parciales para la etapa de filtración:

**Tabla 3.4.** Resultados obtenidos de los balances totales y parciales para la etapa de filtración.

Corrientes	Resultados (kg)
F	1 710
T	90

## 3.3. Propuesta de los sistemas de bombeo de la instalación.

### 3.3.1. Propuesta del Sistema A. Sistema de bombeo de los mezcladores hacia los filtros.

El Sistema A de la instalación propuesta se muestra en el Anexo 3.

Para obtener los resultados del cálculo del balance de Energía Mecánica, se parte de la Ecuación de Bernoulli (ecuación 2.13), a partir de la cual se derivan una serie de ecuaciones que van desde

la ecuación 2.14 hasta la ecuación 2.19. Además, se necesitan saber datos del producto a bombear, que en este caso sería la suspensión fertilizante:

- Densidad ( $\rho$ ): 1 200 kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidad ( $\mu$ ): 0,002 4Pa \* s
- % sólidos: 5
- Volumen: 1,5 m<sup>3</sup>

Para el cálculo del área se necesitan conocer los siguientes datos de la tubería:

- Material: Polipropileno.
- L (Longitud): 3,0 m
- D (diámetro): 0,0254 m
- e (rugosidad): 0,00000 1 mm $\approx$ 0, según para tubos lisos, por tanto,  $e/D \approx 0$ .

También, como requisito del proceso, se sabe que el tiempo de vaciado de cada uno de los mezcladores debe ser de 20 min.

Para el cálculo de las pérdidas locales  $h_{p_{acc}}$  se necesitan conocer los accesorios necesarios, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.5.** Lista de los accesorios necesarios para el cálculo de las pérdidas locales, para el desarrollo del balance de energía mecánica para el Sistema A del proceso.

$\sum K$ (accesorios)	Cantidad	K	
Codos de 90 <sup>0</sup> estándar	3	0,75	2,25
Válvula de globo ½ abierta	1	9	9
Salida a un depósito de gran volumen	1	1	1
			12,3

Los resultados obtenidos por las ecuaciones empleadas para el desarrollo del balance de energía mecánica, se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.6.** Resultado de las ecuaciones empleadas para el desarrollo del balance de energía mecánica para el Sistema A del proceso.

Ecuación	# de la ecuación	Variable a determinar	Resultado
----------	------------------	-----------------------	-----------

$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho * g} + \frac{\Delta V^2}{2 * g} + hp$	2.14	H	5,04 m
$\Delta Z = Z_2 - Z_1$	2.14.1	$\Delta Z$	0,9 m
$hp = hp_t + hp_{acc}$	2.15	hp	4,14 m
$hp_t = f * \frac{L * V^2}{2 * g * D}$	2.15.1	hp <sub>t</sub>	0,22 m
$hp_{acc} = \frac{\sum Ki * V^2}{2 * g}$	2.15.2	hp <sub>acc</sub>	3,92 m
$f = f\left(\frac{e}{D}, Re\right)$	2.15.1.1	f	0,0058
$Re = \frac{D * V * \rho}{\mu}$	2.16	Re	31 330
$V = \frac{Q}{A}$	2.17	V	2,5 m/s
$Q = \frac{V}{t}$	2.18	Q	4,5 m <sup>3</sup> /h
$A = \frac{\pi * D^2}{4}$	2.19	A	0,00051 m <sup>2</sup>
$N = \frac{H * Q * \rho}{3.670 * 10^5}$	2.20	N	0,07 kW

Con el valor de Re calculado  $Re = 31\ 750$  ( $3.1 * 10^4$  ~~→~~  $Re \rightarrow 4000$ , lo que determina un régimen turbulento), y la determinación del régimen turbulento, y empleando la figura 6.9 (Perry et al., 2008), se determina el valor del factor de fricción.

A partir del cálculo de la potencia  $N = 0,07$  kW y tomando un valor de  $\beta=2$ , se obtiene un valor de:  
 $N_{inst.} = 0,14$  kW

A partir de este valor, se selecciona una bomba centrífuga normalizada con las siguientes características técnicas:

- Capacidad, Q: 6,0 m<sup>3</sup>/h
- Carga, H: 6,3 m

Motor:

- Potencia: 0,55 kW
- Trifásico: 220/440 V
- Frecuencia: 60 Hz

Debido a que el producto a bombear contiene sólidos en suspensión, se propone que el tipo de impelente de la misma deba ser abierto o semiabierto (Perry et al., 2008).

### 3.3.2. Propuesta del Sistema B. Sistema de bombeo del filtro al vacío hacia los tanques de almacenamiento.

Como se mencionó en la explicación del proceso, una vez lograda la dilución de las sales fertilizantes en los tanques de mezclado y filtrada la suspensión fertilizante, la solución filtrada es bombeada hacia los tanques de almacenamiento para su posterior envasado. En la figura que se muestra en el Anexo 4, se presenta el Sistema B.

Para obtener las características técnicas de la bomba que transporta la solución fertilizante hacia los tanques de almacenamiento de producto terminado, se sigue la misma metodología que se presentó para el sistema A.

Siguiendo el mismo orden de las ecuaciones presentadas para el Sistema A, a continuación, se presenta una tabla con los resultados obtenidos para esta sección.

**Tabla 3.7.** Resultado de las ecuaciones empleadas para el desarrollo del balance de energía mecánica para el Sistema B del proceso.

Ecuación	# de la ecuación	Variable a determinar	Resultado
$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho * g} + \frac{\Delta V^2}{2 * g} + h_p$	2.14	H	9,88 m
$\Delta Z = Z_2 - Z_1$	2.14.1	$\Delta Z$	3,0 m
	2.15		

$hp = hp_t + hp_{acc}$		hp	6,88 m
$hp_t = f * \frac{L*V^2}{2*g*D}$	2.15.1	hp <sub>t</sub>	0,63 m
$hp_{acc} = \frac{\sum Ki * V^2}{2*g}$	2.15.2	hp <sub>acc</sub>	6,25 m
$f = f\left(\frac{e}{D}, Re\right)$	2.15.1.1	f	0,0059
$Re = \frac{D * V * \rho}{\mu}$	2.16	Re	29 241
$V = \frac{Q}{A}$	2.17	V	2,3 m/s
$Q = \frac{V}{t}$	2.18	Q	4,2 m <sup>3</sup> /h
$A = \frac{\pi * D^2}{4}$	2.19	A	0,00051 m <sup>2</sup>
$N = \frac{H * Q * \rho}{3.670 * 10^5}$	2.20	N	0,14 kW

Para obtener los resultados del cálculo del balance de Energía Mecánica, se parte, como se explicó para el Sistema A, de la Ecuación de Bernoulli (ecuación 2.13), a partir de la cual se derivan una serie de ecuaciones que van desde la ecuación 2.14 hasta la ecuación 2.19.

Para el cálculo del área se necesitan conocer los siguientes datos de la tubería:

- Material: Polipropileno.
- L (Longitud): 10,0 m
- D (diámetro): 0,0254 m
- e (rugosidad): 0,000001 mm≈0, según (Perry et al., 2008), para tubos lisos. Por tanto, e/D≈0

También, como requisito del proceso, se plantea que el tiempo de vaciado del filtro debe ser de 20 min y que el volumen de la solución a bombear es de 1,4 m<sup>3</sup>.

Para el cálculo de las pérdidas locales hp<sub>acc</sub> se necesitan conocer los accesorios necesarios, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.8.** Lista de los accesorios necesarios para el cálculo de las pérdidas locales, para el desarrollo del balance de energía mecánica para el Sistema B del proceso.

$\Sigma K$ (accesorios)	Cantidad	K	
Codos de 90° estándar	4	0,75	3,0
Válvula de globo ½ abierta	3	0,4	1,2
Salida a un depósito de gran volumen	2	9	18,0
	1	1	1
			23,2

Se toma como consideración las posibles sobrecargas, y a partir de esto, el motor se instala con una potencia algo mayor que la potencia consumida. Según Rosabal and Garcell (2010), el coeficiente de reserva  $\beta$ , se toma en dependencia de la magnitud de N. Por lo que se tiene que:

$$N_{inst.} = 0,28 \text{ kW}$$

Una vez determinadas las principales características de la bomba, se selecciona una bomba centrífuga normalizada con las siguientes características técnicas:

- Capacidad, Q: 6,0 m<sup>3</sup>/h
- Carga, H: 13,0 m

Motor:

- Potencia: 0,75 kW
- Voltaje: 220/440 V
- Frecuencia: 60 Hz

### 3.4. Resultado del dimensionamiento de los equipos tecnológicos.

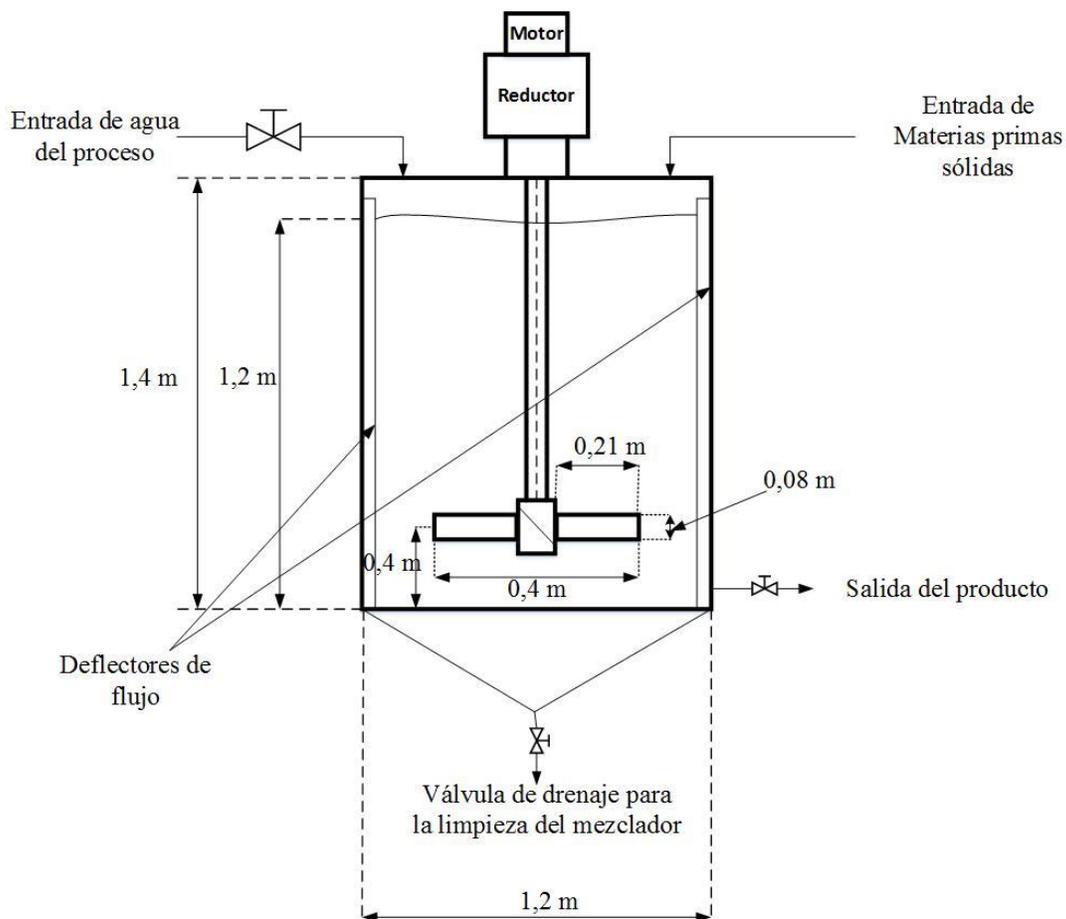
#### 3.4.1. Resultado del dimensionamiento del mezclador.

Para obtener los resultados de las dimensiones del mezclador, se utilizaron varias ecuaciones que van desde la ecuación 2.21 hasta la ecuación 2.24., cuyos resultados se muestran en la tabla que aparece a continuación:

**Tabla 3.9.** Resultado de las ecuaciones empleadas para la determinación de los parámetros de diseño para la dimensión del mezclador propuesto.

Ecuación	# de la ecuación	Variable a determinar	Resultado
$V_e = \frac{\pi * H_0 * D^2}{4}$	2.21	$H_0$	1,2 m
$V_e = \frac{\pi * D^3}{4}$	2.22	D	1,2 m
$H_t = H_0 + H_0 * 10 \%$	2.23	$H_t$	1,4 m
$V_c = \frac{\pi * D^2 * H_c}{4}$	2.24	$V_c$	1,7 m <sup>3</sup>

La etapa de mezclado de la propuesta tecnológica está compuesta por dos recipientes del tipo tanque agitado, a continuación, se muestra el mezclador que se propone para dicha etapa;



**Figura 3.1.** Propuesta de diseño de los mezcladores. Fuente. Elaboración propia.

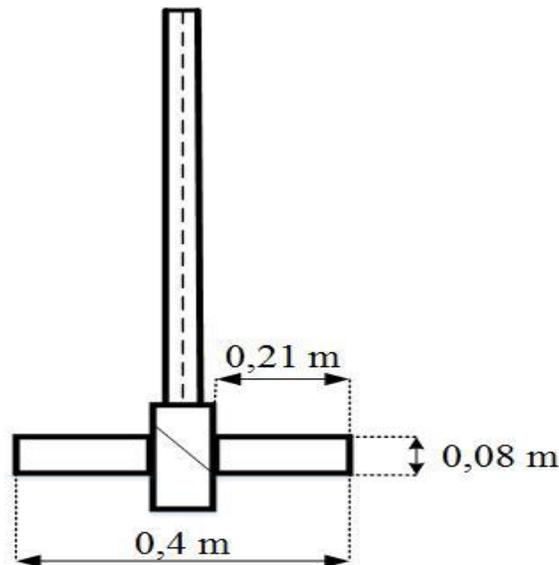
### 3.4.1.1. Resultado del dimensionamiento del agitador.

Los resultados obtenidos para dimensionar el agitador a emplear en la etapa de mezclado del proceso y las relaciones a partir de las cual fueron obtenidas se muestran en la tabla que aparece a continuación:

**Tabla 3.10.** Resultado de los cálculos realizados para obtener las dimensiones del agitador propuesto.

Relaciones	Variable a determinar	Resultado
$Da/D = 1/3$	Da	0,4 m
$L/Da = 1/4$	W	0,08 m
$W/Da = 1/5$	L	0,21 m
$E/Da = 1$	E	0,4 m

En la figura que se presenta a continuación, muestra la propuesta de agitador de paletas que se propone para la tecnología en cuestión:



**Figura 3.2.** Agitador de paletas propuesto. Fuente. Elaboración propia.

### 3.4.2. Propuesta de las resistencias eléctricas para el calentamiento del agua.

Para realizar la propuesta de la resistencia eléctrica se parte del resultado obtenido como parte del Balance de Energía planteado, del cual se tiene que la cantidad de calor necesario para calentar el

agua desde la temperatura ambiente hasta 80 °C, cuyo valor es de 68 310 kcal (286 000 kJ). El área del tanque de mezclado se determina por la ecuación 2.25, cuyo resultado se muestra a continuación:

$$A = \frac{\pi * (1,2 \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 1,13 \text{ m}^2 (11\ 300 \text{ cm}^2)$$

A partir de este resultado, y con la ecuación 2.26 se calcula la carga del sistema:

$$\text{Carga} = \frac{79\ 444,5 \text{ W}}{(11\ 300 \text{ cm})^2}$$

$$\text{Carga} = 7,0 \text{ W/cm}^2$$

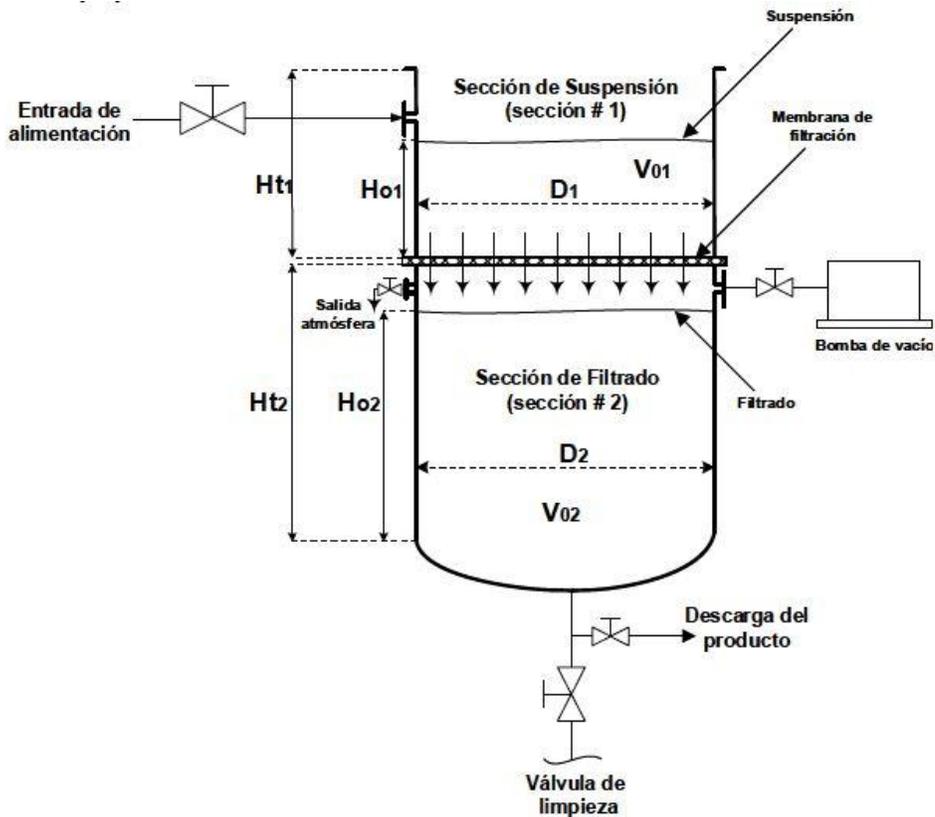
Con el resultado de la carga, se procede a la selección de la resistencia eléctrica que más se adecúa, mediante Catálogos Técnicos de Resistencias Eléctricas (S.A., 2014) de donde se seleccionan dos resistencias de inmersión normalizadas cuyas características técnicas se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.11.** Principales características de las resistencias que fueron seleccionadas para el calentamiento del agua en los mezcladores.

Potencia	Voltaje	Longitud	Carga	Material del tubo
2 500 W	220 V	450 mm	7,5 W/cm <sup>2</sup>	Acero Inoxidable

### 3.4.3. Resultado del dimensionamiento del filtro.

Como resultado del estudio realizado, se concluye que el filtro que más se adecúa a la tecnología propuesta es un filtro al vacío del tipo Nutsche al vacío, el cual consiste en un recipiente de tipo cilíndrico vertical dividido en dos secciones. A continuación, se muestra un esquema en el que puede observarse el filtro anteriormente mencionado:



**Figura 3.3.** Esquema del filtro al vacío propuesto. Fuente (Rosendi, 2017).

**3.4.3.1. Resultados del dimensionamiento de la sección de filtrado (sección #2).**

A partir de las siguientes consideraciones;

- $V_{02} = 1,5 \text{ m}^3$  (sin considerar el volumen del fondo).
- $D_2/H_{02} = 1$ .
- La altura de sobrediseño  $H_{sd}$  de un 20 %.

Los resultados obtenidos para dimensionar dicha sección, así como las ecuaciones que fueron utilizadas, se muestran en la tabla que aparece a continuación:

**Tabla 3.12.** Resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados para el dimensionamiento de la sección de filtrado.

Ecuación	No. de la ecuación	Variable a determinar	Resultado
$D_2 = \sqrt[3]{4 * \frac{V_{02}}{\pi}}$	2.28	$D_2$	1,2 m

$D_2/H_{02} = 1$		$H_{02}$	1,2 m
$H_{t2} = H_{02} + H_{sd}$	2.29	$H_{t2}$	1,4 m
$V_{t2} = \pi * \frac{D_2^2}{4} * H_{t2}$	2.30	$V_{t2}$	1,6 m <sup>3</sup>

### 3.4.3.2. Dimensionamiento de la sección de suspensión (sección #1).

Para obtener los resultados del dimensionamiento de la sección de suspensión, se parte de las siguientes consideraciones;

- $V_{01} = \frac{1}{3} * V_{02}$
- $V_{02} = 1,5 \text{ m}^3$
- $V_{01} = 1,5/3 = 0,5 \text{ m}^3$
- $D_{01} = D_{02} = 1,2 \text{ m}$
- La altura de sobrediseño  $H_{sd}$  de un 20 %.

En la tabla que se muestra a continuación se muestran los resultados de los cálculos realizados para obtener de las dimensiones de dicha sección, para ello se utilizaron varias ecuaciones que van desde la ecuación 2.31 hasta la ecuación 2.33.

**Tabla 3.13.** Resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados para el dimensionamiento de la sección de suspensión.

Ecuación	No. de la ecuación	Variable a determinar	Resultado
$V_{01} = \pi * \frac{D_{01}^2}{4} * H_{01}$	2.31	$H_{01}$	0,4 m
$H_{t1} = H_{01} + H_{sd}$	2.32	$H_{t1}$	0,5 m
$V_{t1} = \pi * \frac{D_1^2}{4} * H_{t1}$	2.33	$V_{t1}$	0,6 m

A partir de los cálculos anteriormente desarrollados, se procede a realizar un resumen de los principales parámetros de diseño del filtro al vacío seleccionado, el cual se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 3.14.** Resumen de los parámetros de diseño para la sección de suspensión y para la sección de filtrado, del filtro seleccionado.

<b>Sección de suspensión (sección #1)</b>		<b>Sección de filtrado (sección #2)</b>	
Volumen de trabajo ( $V_{01}$ )	0,5 m <sup>3</sup>	Volumen de trabajo ( $V_{02}$ )	1,5 m <sup>3</sup>
Altura de la suspensión ( $H_{01}$ )	0,4 m	Altura de la suspensión ( $H_{02}$ )	1,2 m
Volumen total ( $V_{t1}$ )	0,6 m	Volumen total ( $V_{t2}$ )	1,6 m
Altura total ( $H_{t1}$ )	0,5 m	Altura total ( $H_{t2}$ )	1,4 m
Diámetro ( $D_1$ )	1,2 m	Diámetro ( $D_2$ )	1,2 m

### 3.4.3.3. Resultados del dimensionamiento del sistema al vacío.

#### 3.4.3.3.1 Resultado del dimensionamiento de la sección de suspensión.

Para proceder con los cálculos para el dimensionamiento de la bomba de vacío a emplear en la operación de filtración, se necesitan conocer los siguientes datos de la suspensión;

- Densidad ( $\rho$ ): 1 200 kg/m<sup>3</sup>
- $H_{01}$ : 0,4 m

A partir de estas consideraciones, se aplica la ecuación 2.34, cuyo resultado se muestra a continuación:

$$P_1 = 1\,200 \text{ kg/m}^3 * 0,4 \text{ m}$$

$$P_1 = 480 \text{ kg/m}^2$$

$$P_1 = 0,048 \text{ kg/cm}^2$$

A partir del resultado de  $P_1$ , la cual es la presión ejercida por la suspensión en esta sección de trabajo, se considera ésta como la presión hidrostática.

#### 3.4.3.3.2. Resultado del dimensionamiento de la sección de filtrado.

Según la consideración de que  $\Delta P = 0,9 \text{ kgf/cm}^2$ , y empleando la ecuación 2.35, la ecuación 2.35.1 y la ecuación 2.35.2, se obtienen los siguientes resultados:

$$P_{2\text{man}} = 0,048 \text{ kg/cm}^2 - 0,9 \text{ kgf/cm}^2$$

$$P_{2\text{man}} = - 0,852 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{2\text{abs}} = 1 + (-0,852 \text{ kg/cm}^2)$$

$$P_{2\text{abs}} = 0,148 \text{ kg/cm}^2$$

Tomando en cuenta que el volumen total de la sección de filtración igual a 1,6 m<sup>3</sup>, y considerando que el tiempo tecnológico para lograr el vacío para dar comienzo a la operación de filtración debe ser de 30 min, tenemos que:

$$\text{Cap. Asp.} = \frac{V_t}{t}$$

$$\text{Cap. Asp.} = \frac{1,6 \text{ m}^3}{30 \text{ min}}$$

$$\text{Cap. Asp.} = 0,053 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{Cap. Asp.} = 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

Después de obtenidos los principales parámetros de selección de la bomba de vacío, se realiza la propuesta de una bomba de membrana con resistencia química, las cuales presentan una solución excelente para hacer vacío en presencia de productos corrosivos y que no se requiere un nivel alto de vacío. Se conoce que en el funcionamiento de este tipo de bomba no se consume agua y por lo tanto no se produce agua contaminada (Rosendi, 2017). Las características técnicas de la bomba propuesta se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.15.** Principales características de la bomba seleccionada para el sistema de vacío.

<b>Características técnicas de la bomba</b>	
Vacío final (abs)	0,148 kg/cm <sup>2</sup>
Capacidad de aspiración	4,3 m <sup>3</sup> /h
Voltaje	220/440 V
Frecuencia	60 Hz
Potencia del motor	0,37 kW

# CONCLUSIONES

1. Los fundamentos científicos revisados y estudiados para esta investigación han demostrado que gracias a técnicas como la fertirrigación y a la aparición de los fertilizantes NPK líquidos es posible suministrar los nutrientes y micronutrientes requeridos por los diversos tipos de cultivos y lograr controlar su desarrollo.
2. Un sistema de mezclado en frío es adecuado, viable y conveniente para el proceso tecnológico que se propuso, debido a su poca complejidad tecnológica en cuanto a cantidad y diversidad de equipos de proceso.
3. El esquema tecnológico propuesto es adecuado para los fines que se propone lograr con la investigación realizada, de ahí que la producción estimada anualmente de fertilizantes líquidos NPK será de 1 127,1 m<sup>3</sup>.
4. Se comprobó que la utilización de dos mezcladores con agitador mecánico incluido, de 1,5 m<sup>3</sup> de capacidad y el empleo de un filtro al vacío del tipo Nutsche, cuyo volumen total de trabajo es de 2,0 m<sup>3</sup>, constituye la mejor alternativa para la tecnología propuesta.

# RECOMENDACIONES

1. Realizar el análisis económico - ambiental del costo de inversión y explotación de la tecnología seleccionada.
2. Ejecutar la propuesta tecnológica como parte integrante del proyecto de producción de fertilizantes líquidos NPK en la Empresa Química de Cienfuegos.
3. Estudiar la factibilidad de aplicar esta tecnología en otros entornos con una situación similar a la expuesta en esta investigación.

# BIBLIOGRAFÍA

- Agrotrapiche, S. L. (2014). *Fertilizantes líquidos personalizados*. [http://agrotrapiche.com/?page\\_id=552#sthash.vx4MHRKY.dpuf](http://agrotrapiche.com/?page_id=552#sthash.vx4MHRKY.dpuf)
- Albertos, P. M. (2006). *Abonos líquidos y su aplicación a la agricultura de canarias*.
- Argandar, I. C. G. (2007). *El uso de los fertilizantes líquidos para el fertirriego*. (Especialización en Química Aplicada.), Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/356/1/Crispin%20Gonzalez%20Argandar.pdf>
- Aycho, J. I. Z. (2019). *Evaluación de la calidad de biol de segunda y tercera generación de estiércol de cuy producido en un biodigestor instalado en el instituto regional de la costa de la unalm*. (Tesis de grado), Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/4044/zanabria-aycho-jose-ismael.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Barbieri, D., Saínez, A., & Maringolo, M. (2010). *Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: Pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno*.
- Bautista, L. A. A., & Vásquez, H. J. A. N. (2020). *Prototipo de un control de relación basado en un controlador lógico programable para la mezcla de fertilizantes líquidos en Gat Perú SAC – Trujillo*. (Tesis de grado), Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Bordoli, I. A. J. M., & Barbazán, I. A. M. (2010). *Aplicación de Fertilizantes*. <http://www.fao.org/3/mz476es/mz476es.pdf>.
- Carulla, D. (2016). *Valorización de amonio de aguas residuales urbanas como fertilizante líquido utilizando contactores de membrana de fibra hueca*. (Tesis de fin de grado).
- Casanova, O., Barbazan, M., & Barreto, P. (2015). *Tecnología de los Fertilizantes*. Paper presented at the Curso de Fertilidad de suelos y su manejo 2015. [www.fagro.edu.uy](http://www.fagro.edu.uy)
- Castillo, M. A.-P. (2017). *Categorización de accidentes en plantas de producción de fertilizantes*. (Tesis de grado), Universidad Politécnica de Madrid. [http://oa.upm.es/47553/1/TFG\\_MANUEL\\_ARIAS\\_PAZ\\_CASTILLO.pdf](http://oa.upm.es/47553/1/TFG_MANUEL_ARIAS_PAZ_CASTILLO.pdf)
- Díaz, C. N. (2014). *Propuesta de plan de exportación de un fertilizante foliar a base de NPK en el Ecuador basada en un análisis del sector arrocero y la demanda potencial de los mercados de Perú*. (Tesis de grado), Universidad De Especialidades Espiritu Santo.
- Díaz, E. R., & Guzmán, M. (2014). *Características de los fertilizantes para su uso en la fertirrigación*. <https://www.researchgate.net/publication/257416472>.
- Duggan, M. T. (2016). *Caracterización y manejo de fertilizantes líquidos en la Argentina*. [torresduggan@tecnoagro.com.ar](mailto:torresduggan@tecnoagro.com.ar)
- Estrelles, D. I. (2017). *Diseño de una planta de producción de fertilizantes NPK líquidos con una producción de 300 Tm/día situada en el polígono industrial ‘El Tossalet’ de Bèlgida*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Fertirrigación, F. (2016). *Catálogos de productos, 2016*. [https://repository.usergioarboleda.edu.co/bitstream/handle/11232/1120/Dise%C3%B1o%20de%20un%20sistema%20de%20producci%C3%B3n%20y%20operaciones.%20A\\_GROFERT.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.usergioarboleda.edu.co/bitstream/handle/11232/1120/Dise%C3%B1o%20de%20un%20sistema%20de%20producci%C3%B3n%20y%20operaciones.%20A_GROFERT.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Francia, Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. (2011). *Los fertilizantes y su uso*. IFA. 2011/2011-06-

24. %20Estimaciones%20de%20IFA%20sobre%20el%20mercado%20mundial%20de%20fertilizantes. <http://www.anffe.com/noticias>

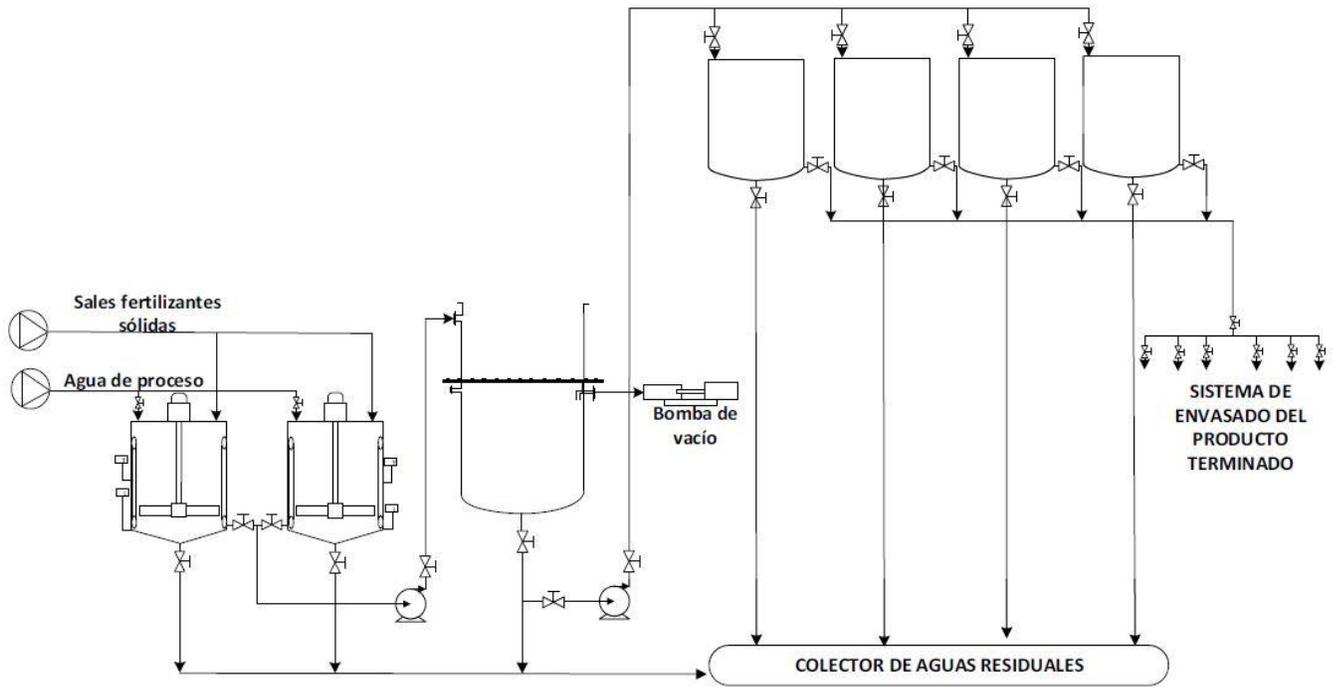
- García, F. P. (2009). *La fertilización y la fertirrigación, programas de nutrición, influencia sobre la programación*. <https://www.agroecologia.net/recursos/publicaciones/manuales-tecnicos/manual-fertilizacion-fpomares.pdf>
- Grasso, A., & Díaz-Zorita, M. (2018). *Manual de buenas prácticas de manejo de fertilización*. [https://www.fertilizar.org.ar/subida/BMPN/BPMN\\_Fertilizar102018.pdf](https://www.fertilizar.org.ar/subida/BMPN/BPMN_Fertilizar102018.pdf)
- Gutiérrez, D. A. G. (2017). *Proceso de fabricación de fertilizantes aditivados multiproducto*. (Tesis de grado), Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5828/fichero/Tomo+I+Memoria+Descriptiva.pdf>
- Helfgott, S., Cañamero, M., & Laguna, T. (2018). *Manual de utilitario nutriagro*.
- Hernández, C. M. (2019). *Comparación de cuatro criterios de dosificación de fertilización nitrogenada en maíz*. (Tesis de grado), Universidad Nacional De Río Cuarto.
- Jaramillo, R. (2015). *Perspectivas en el uso eficiente de fertilizantes, nuevas tecnologías y retos en el futuro de una agricultura sostenible*. [www.ipni.net](http://www.ipni.net)
- Kafkafi, U., & J.Tarchitzky. (2012). *Fertirrigación. Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua*. [https://www.fertilizer.org/images/Library\\_Downloads/2012\\_ifa\\_fertigation\\_spanish.pdf](https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2012_ifa_fertigation_spanish.pdf)
- Libre, M. (2015). *Bayfolan Bayer Fertilizante Nutriente Foliar*. <http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-496499956-bayfolan-bayer-fertilizantenutriente-foliar-jm>
- Litardo, J. F. A. (2019). *“Evaluación de los diferentes niveles de fertilización con NPK en el cultivo de maíz (Zea mays) sembrado en condiciones de secano en la zona de Ventanas”*. (Tesis de grado), Universidad Técnica Estatal De Quevedo.
- López, E. P., & Barrantes, D. R. (2017). Estudio físico-químico para la formulación de un fertilizante líquido de composición completa. *Pensamiento Actual*, 17, 18.
- Lozano, Z., Hernández, R., Bravo, C., Rivero, C., Toro, M., & Delgado, M. (2012). Disponibilidad de fósforo en un suelo de las Sabanas bien drenadas venezolanas, bajo diferentes coberturas y tipos de fertilización.
- Mantilla, Z. A. R. (2016). *Evaluación técnica y financiera para la creación de una nueva línea de fertilizantes orgánico-químico específicos en la empresa Abitc S.A.S (Abonos integrales todo incluido)*. (Tesis de grado), Universidad Industrial de Santander. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2016/165094.pdf>
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química.(versión digital).(4ta Edición)*. M. Hill (Ed.)
- Meléndez, G., & Molina, E. (2003). *Fertilizantes: Características y manejo*. <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Curso%20Fertilizantes.pdf>.
- Melgar, R., & Duggan, M. T. (2014). *Manual de fertilizantes fluidos : Cómo optimizar el uso de fertilizantes fluidos en Argentina y agro-sistemas sudamericanos* <https://www.fertilizar.org.ar/subida/Investigar/LIBROFERTIFluidos.pdf>
- Molina, E. (2003). *Fertilizantes: conceptos básicos y definiciones. Curso de capacitación. Centro de Investigaciones Agronómicas. Centro de Investigaciones Agronómicas*.

- Murillo, C. (2011). *Respuesta agronómica del maíz híbrido S-810 en presencia de dosis y épocas de aplicación de un promotor de crecimiento a base de un extracto de algas marinas*. <https://es.scribd.com/doc/242645735/Manual-Internacional-de-Fertilidad-de-Suelos-pdf>
- Oliveira, P. C. R. (2017). *Análisis y prevención de riesgos en el uso de fertilizantes en agricultura*. (Tesis de maestría), Universidad de Da Coruña. [https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/20373/RibeiroOliveira\\_PaulaCristina\\_TFM\\_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/20373/RibeiroOliveira_PaulaCristina_TFM_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Pavlov, K. F., Romankov, P. G., & Noskov, A. A. (1981). *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*. E. M. Moscú Ed.
- Pérez, D. R. M., Martín, D. T. G., & Asensio, D. J. M. S. d. G. y. (2011). Fertilización y corrección edáfica de suelos agrícolas con productos orgánicos. *Tecnología y Desarrollo, IX*.
- Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (2008). *Chemical Engineers Handbook* (8va edición). McGraw-Hill Companies.
- Peter, M., & Timmeraus, K. D. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. N. Y. McGraw-Hill. (Ed.)
- Plúas, A. E. O. (2018). *Efecto de la aplicación de fertilizantes macro y micro sobre el cultivo de maíz (Zea mays L.)*. Universidad de guayaquil.
- Pro-Agro. (2015). Bayfolan forte, nutriente vegetal foliar. <http://www.pro-agro.com.mx/prods/bayer/bayer07.htm>
- Riascos, R. G. (2004). *Manual Técnico - Propiedades Generales de los Fertilizantes (4 ed). Curso de capacitación. Centro de Investigaciones Agronómicas*.
- Rodríguez, C., Gil, R., & Soto, B. (2014). *Fertilizantes líquidos y ecológicos. Actualidad y perspectiva*. (Ponencia). Evento Internacional. La Habana, Cuba, CUBAINDUSTRIA.
- Rosabal, J., & Garcell, L. (2010). *Hidrodinámica y separaciones mecánicas Vol I*. Editorial Félix Varela.
- Rosendi, Y. A. C. (2017). *Diseño ambientalmente sostenible de los fertilizantes líquidos NPK en la Empresa Química de Cienfuegos*. (Tesis de maestría), Universidad de Cienfuegos S.A., E. S. (2014). Resistencias eléctricas para inmersión. Catálogo técnico. <http://www.salvadorescoda.com>
- Salinas, J. A. F., & Londoño, J. A. S. (2017). *Perfil Técnico Ambiental para determinar criterios de sostenibilidad para fertilizantes*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Tecnología de sistema de vacío. Catálogo 2014 - 2015. (2015). <http://www.vacuubrand.com>
- Torero, M. (2017). Estrategia sectorial para la actualización tecnológica y empresarial de productos agroquímicos y maquinaria agrícola. *Cuba sostenible*. [https://www.unido.org/sites/default/files/2017-05/Cuba\\_report\\_v\\_2.3\\_-print\\_ES-LS2\\_0.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/2017-05/Cuba_report_v_2.3_-print_ES-LS2_0.pdf).
- Vélez, J. P. P. (2014). *Uso de los fertilizantes y su impacto en la producción agrícola*. Universidad Nacional de Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/39459/1/71782231.2014.pdf>
- Villegas, C. A. A., & Granados, L. A. O. (2006). *Estudio de factibilidad para la fabricación de abono fermentado de tipo bokashi*. (Tesis de grado), Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Zaragozano, F. J. L. (2013). *Estudio de la fertirrigación nitrogenada con el inhibidor de la nitrificación 3,4 DIMETILPIRAZOLFOSFATO (DMPP) en melocotonero 'Miraflores'*.

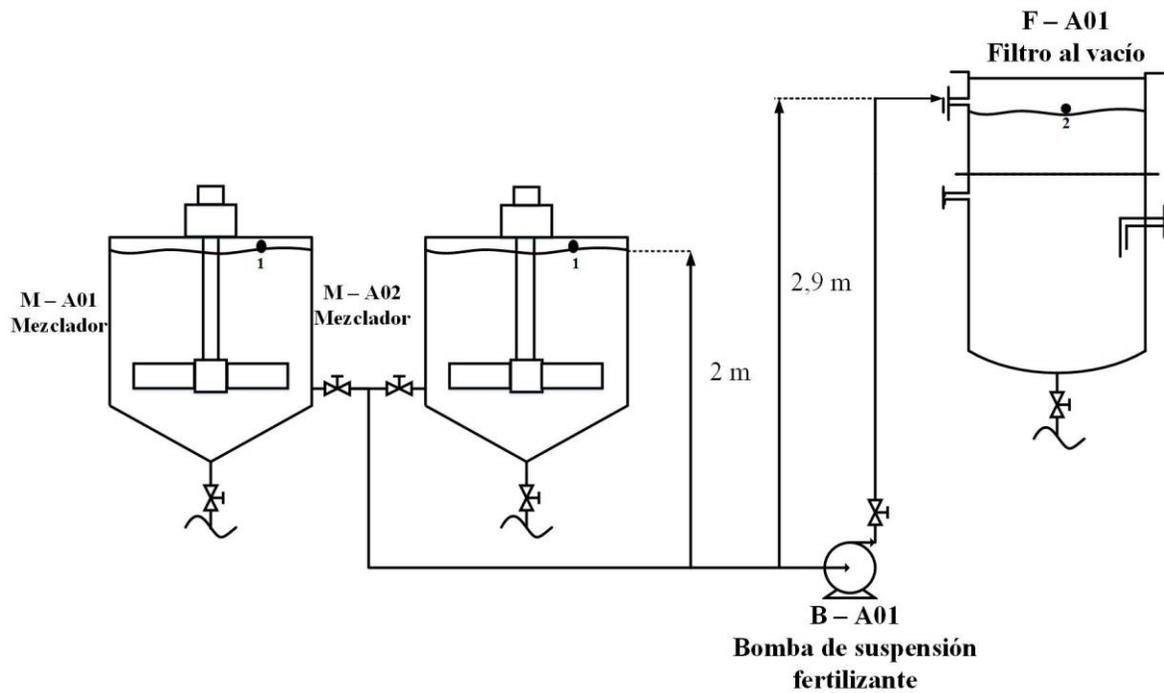
(Tesis doctoral), Universidad de Zaragoza.  
[http://digital.csic.es/bitstream/10261/94479/1/LorenJ\\_TD-EEAD\\_2014.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/94479/1/LorenJ_TD-EEAD_2014.pdf)



**Anexo 2.** Diagrama de flujo del proceso de producción de fertilizantes líquidos NPK.



**Anexo 3.** Sistema A. Sistema de bombeo desde los mezcladores hacia el filtro al vacío.



**Anexo 4.** Sistema B. Sistema de bombeo del filtro al vacío hacia los tanques de almacenamiento.

