

ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE POLICLORURO DE VINILO SIN  
PLASTIFICANTE A PARTIR DE HONGOS AISLADOS DE UNA MUESTRA DE  
SUELO CONTAMINADO CON RESINA DE DICHO MATERIAL

**MARÍA LUISA PARDO RODRÍGUEZ**

Universidad Libre

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Ambiental

Bogotá, 2020

ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE POLICLORURO DE VINILO SIN  
PLASTIFICANTE A PARTIR DE HONGOS AISLADOS DE UNA MUESTRA DE  
SUELO CONTAMINADO CON RESINA DE DICHO MATERIAL

**MARÍA LUISA PARDO RODRÍGUEZ Cod 64014024**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Ambiental

Director: Msc. Patricia Joyce Pamela Zorro Mateus

Universidad Libre

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Ambiental

Bogotá, 10 de junio de 2020

## HOJA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado “ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE POLICLORURO DE VINILO SIN PLASTIFICANTE A PARTIR DE HONGOS AISLADOS DE UNA MUESTRA DE SUELO CONTAMINADO CON RESINA DE DICHO MATERIAL” realizado por la estudiante María Luisa Pardo Rodríguez con código 6414024, cumple con todos los requisitos legales exigidos por la Universidad Libre para optar al título de Ingeniero Ambiental.

Director de proyecto

Evaluador 1

Evaluador 2

## AGRADECIMIENTOS

A mi madre, a mi familia, profesora y demás personas que fueron participes en el desarrollo de este proyecto, dedicando su tiempo y dando ejemplo para seguir cada día adelante, ellos son quienes me exigen y me enseñan cada día a ser mejor persona, todos ellos son los que inspiran mi profesión.

## RESUMEN

Actualmente se evidencia una descontrolada generación de residuos plásticos, el manejo de grandes volúmenes de estos residuos resulta cada vez más difícil debido a que tardan mucho en descomponerse, lo que los hace persistentes en el medio ambiente y ocasiona que la vida útil de los rellenos sanitarios disminuya. El policloruro de vinilo (PVC) es uno de los plásticos más usados en la vida diaria y de los que más residuos se producen. Por lo anterior, se investigó acerca de la degradación de PVC sin plastificante a partir de hongos aislados de una muestra de suelo contaminada con resina de PVC. Los hongos se aislaron y se caracterizaron morfológicamente, luego se llevaron a cabo pruebas preliminares con 8 de estos aislamientos, en medio mínimo de sales y sobre una película de PVC. De estas, se escogieron los dos aislamientos con mejores resultados para hacer curvas de crecimiento, encontrando que corresponden a *Penicillium* sp., y *Mucor* sp. Este último fue el que mostró los mejores resultados en las curvas de crecimiento. Aunque los resultados mostrados en este documento son preliminares, abren la puerta a nuevas formas de degradación de residuos de PVC que son muy persistentes.

## ABSTRACT

*Nowadays, there is an uncontrolled generation of plastic waste, and the handling of these large volumes is becoming increasingly difficult because it takes a long time to decompose. Because of that, it remains in the environment causing a decreasing in the life of the landfills. Vinyl polychloride (PVC) is one of the most used plastics currently, therefore it results in a big generation of waste. We research the degradation of PVC without plasticizer through soil isolated fungi from soil contaminated with PVC. We isolated and characterized morphologically fungi and then, we carried on preliminary tests with 8 of the isolated fungi, in minimum salt medium and on PVC films. We chose the two best isolations and conducted growth curves with them. We found that these isolations belong to *Penicillium* sp., and *Mucor* sp. The last showed the best results in the growth curves. Although this research has a preliminary focus, it opens the door to new ways of degrading PVC wastes, which are very persistent.*

## LISTA DE CONTENIDO

1. GENERALIDADES .....	16
1.1 PROBLEMA.....	16
1.2 OBJETIVOS .....	17
1.2.1 Objetivo General.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos .....	17
1.3 MARCO REFERENCIAL .....	18
1.3.1 Marco teórico.....	18
1.3.1.1 Reciclaje de PVC.....	19
1.3.1.2 Problemas generados por los residuos por PVC .....	21
1.3.2 Marco conceptual .....	24
1.3.2.1 Fabricación de PVC.....	24
1.3.2.2 Tipos de PVC .....	27
1.3.2.3 Hongos .....	28
1.3.2.4 Técnicas para medir la degradación.....	30
1.3.3 Marco referencial.....	33
1.3.3.1 Situación actual del PVC .....	33
1.3.3.2 Importancia del PVC.....	35
1.3.3.3 Disposición de PVC.....	37
1.3.3.4 Avances para degradar PVC .....	38
1.4 METODOLOGIA.....	41
1.4.1 Primera etapa: caracterización de especies fúngicas encontradas.....	41

1.4.2 Segunda etapa: pruebas preliminares de degradación.....	43
1.4.3 Etapa tres: curvas de crecimiento de los dos aislamientos fúngicos con mejores resultados .....	44
1.4.4 Etapa cuatro: análisis estadístico de los datos .....	45
1.4.5 Etapa cinco: análisis del ciclo de vida de PVC para determinar la eficiencia de los hongos.....	45
2. RESULTADOS .....	47
2.1 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA .....	47
2.1.1 Toma de muestra.....	47
2.1.2 Especies aisladas .....	47
2.1.3 Especies escogidas para pruebas preliminares.....	52
2.2 PRUEBAS PRELIMINARES .....	54
2.2.1 Tratamiento térmico .....	54
2.2.2 Masa ganada por el hongo .....	55
2.2.3 Masa pérdida por la película de PVC.....	56
2.2.4 Masa de cloruro en el sobrenadante.....	57
2.2.5 Espectro Infrarrojo .....	57
2.3 CURVAS DE CRECIMIENTO .....	59
2.3.1 Curva de crecimiento .....	59
2.3.2 Curva de crecimiento vs esporas en el medio.....	60
2.3.3 Curva de crecimiento vs masa de cloruro en el sobrenadante.....	62
2.3.4 Curva de crecimiento vs masa pérdida de la película .....	63
2.3.5 Espectro infrarrojo.....	64

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	66
3.1 PRUEBAS PRELIMINARES.....	66
3.2 CURVAS DE CRECIMIENTO.....	68
3.3 REVISIÓN DEL CICLO DE VIDA DE PVC .....	74
3.3.1 Producción.....	75
3.3.2 Transformación.....	75
3.3.3 Uso .....	75
3.3.4 Fin de vida .....	76
3.3.5 Eliminación .....	77
3.3.6 Recuperación.....	78
3.3.7 Estudio de caso reciclaje químico.....	78
3.3.8 Comparación con la biodegradación .....	80
4. CONCLUSIONES .....	82
5. RECOMENDACIONES.....	84
6. BIBLIOGRAFIA.....	85

## **LISTA DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1. Espectro IR de PVC .....	31
Ilustración 2. Proceso de disolución de la muestra homogenizada .....	42
Ilustración 3. Toma de muestra de suelo .....	47
Ilustración 4. Box plot para los datos obtenidos de masa ganada por el hongo para ensayos de películas tratadas con calor (masa c) y sin calor (masa sc).....	55

Ilustración 5. Masa ganada por el hongo en segundas pruebas preliminares.....	56
Ilustración 6. Masa pérdida de película de PVC en segundas pruebas preliminares.....	56
Ilustración 7. Masa de cloruro en el sobrenadante en segundas pruebas preliminares.....	57
Ilustración 8. Espectro IR especies AB y Q en segundas pruebas preliminares, en comparación con el espectro de una película de PVC sin tratamiento (Blanco PVC).....	58
Ilustración 9. Curva de crecimiento especie <i>Mucor</i> sp., y <i>Penicillium expansum</i> .....	60
Ilustración 10. Curva de crecimiento vs esporas en el medio de las dos especies seleccionadas .....	61
Ilustración 11. Curva de crecimiento vs masa de cloruro presente en el sobrenadante de las dos especies seleccionadas.....	63
Ilustración 12. Curvas de crecimiento vs masa pérdida de la película de PVC para las dos especies seleccionadas .....	64
Ilustración 13. Espectro IR de <i>Mucor</i> sp y <i>Penicillium expansum</i> .....	65
Ilustración 14. Ciclo de vida de PVC.....	74
Ilustración 15. Identificación de impactos ambientales en la biodegradación.....	83
Ilustración 16. Matriz de impactos ambientales en la biodegradación .....	83
Ilustración 17. Matriz de impactos ambientales en el reciclaje químico.....	84

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Hongos aislados de la muestra de suelo tomada en la empresa de fabricación y comercialización de PVC.....	52
Tabla 2. Especies fúngicas para pruebas preliminares.....	54

## INTRODUCCION

La industria de los plásticos ha evolucionado con el pasar del tiempo, desarrollando termoplásticos como el policloruro de vinilo (PVC), cuyos principales usos es: en tuberías de distribución y cañerías de agua potable, implementos de viviendas, muebles, tapicería, entre otros [1]. Sin embargo, debido a la gran demanda que tiene, se generan altas cantidades de residuos de este material, ocho millones de toneladas de plásticos acaban en mares y océanos anualmente, generando del 60 al 80% de la basura marina, existen cinco islas de basura (dos en el océano Pacífico, dos en el Atlántico y una en el Índico) formadas por microplásticos [2]. De acuerdo con Camilo Giraldo, director de la Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud Pública de la Universidad de los Andes en 2050 habrá aproximadamente 32 millones de toneladas de plástico como residuo, lo que llevará a que en el océano haya más plástico que peces [3]. El principal problema de los desechos de PVC es el tiempo que tardan en descomponerse, en algunas ocasiones esto puede tomar entre 100 y 1000 años, lo que genera que la vida útil de los rellenos sanitarios disminuya porque se acumulan grandes cantidades de desperdicio [4].

De acuerdo con un artículo publicado por el Diario Occidente en 2019, cada persona en Colombia desecha dos kilogramos de plástico al mes, es decir 24 kilos de basura plástica per cápita en un año, lo que se traduce en 1,2 millones de toneladas al año en el país, sin embargo solo se recicla el 7%, siendo esta alternativa una de las más sencillas, a pesar de ello no se logra dar una disposición final efectiva, debido a que según estas cifras aproximadamente cerca del 93% terminaría en el relleno sanitario [5].

De igual forma, existen otras formas de tratamiento final para los residuos de PVC, como: la degradación térmica, donde se eleva el material a temperaturas aproximadas a los 450°C y se obtiene como resultado la generación de moléculas de radicales libres, CO, iones libres, etc. Otra forma es la degradación por radiaciones donde se expone el residuo a emisiones de alta energía, obteniendo cambios químicos en las sustancias orgánicas del desecho. También se usa la degradación mecánica, en la que se realiza una fractura del material y provoca cambios químicos que son inducidos por los esfuerzos mecánicos [6]. Finalmente, se encuentra la biodegradación con microorganismos donde se usan por ejemplo los hongos, que poseen capacidad bioquímica y ecológica para degradar productos químicos orgánicos, tienen la capacidad de formar redes miceliales extendidos y de crecer en bajos valores de pH, además de ser de bajo costo y de fácil acceso [7].

Teniendo como base la biodegradación, se realizó una búsqueda bibliográfica, a pesar de que se encuentran pocos estudios reportados sobre la degradación de PVC a partir de hongos. En 1999 Kirbas, Guner y Keskin estudiaron la degradación de PVC con las especies fúngicas *Pleurotus* sp., *Poliporus versicolor* y *Phanerochaete chrysosporium*, encontrando que el mejor resultado lo mostraba la especie *Poliporus versicolor* con 19,32% de degradación y una disminución del 82,15% en los enlaces CH, mientras que las otras especies reportaban porcentajes menores al 13,17% [8]. Por otra parte, en 2012 Muhammad I., Ahmed S., Geoff R. (et. al.) probaron la degradación de láminas de PVC con las especies *Phanerochaete chrysosporium*, *Lentinus tigrinus*, *Aspergillus niger* y *Aspergillus sydowii*, como resultado se obtuvo la comprobación de cambios en el color y deterioro de las películas analizadas, también evidenciaron cambios físicos en ellas, los cuales según la espectroscopia de infrarrojo

se asociaron a la aparición de anillos hexagonales y desplazamiento en sus picos de  $2\text{cm}^{-1}$ , estas observaciones se realizaron por medio de FTIR [9].

Con base en las cifras mostradas anteriormente, se comprobó que los residuos de PVC resultan ser un problema, ya que no se disponen de la forma más efectiva y ocasionan un daño importante al medio ambiente, a pesar de ello se evidencia, que la biodegradación es una alternativa que ofrece importantes ventajas, es por esto que se aprovechó la posibilidad de acceder a un suelo que ha estado contaminado con resina de PVC por varias décadas y de este, se aislaron hongos que tuvieran capacidad de degradación de este material. El objetivo de este trabajo fue el estudio de la degradación de una película de PVC sin plastificante a partir de hongos aislados de una muestra ambiental de suelo contaminado con resina de PVC. Para alcanzar dicho objetivo, se aislaron hongos de un suelo, se sometieron a pruebas preliminares para buscar aquellos que mostraran alguna capacidad de degradación de PVC y finalmente, con los hongos con los que se obtuvieron mejores resultados se realizaron curvas de crecimiento.

## JUSTIFICACION

La necesidad del hombre por satisfacer día a día sus necesidades, ha ocasionado que el planeta sufra cambios irreparables, el uso incontrolable de plásticos como el PVC hace que se generen grandes cantidades de desechos que no son eficazmente degradados, causando que terminen en mares o rellenos sanitarios entorpeciendo el funcionamiento de estos. Debido a que este material tiene gran acogida por su resistencia, larga duración y alta flexibilidad es usado en diferentes sectores de la industria, pero estas no logran controlar la cantidad de desechos generados.

Para dar solución a la cantidad de residuos de PVC, hoy en día, existen diversas formas de degradación de PVC, como las mencionadas en la sección de introducción, donde se menciona la degradación térmica, la degradación por radiaciones y finalmente se usa la degradación mecánica [6].

La biodegradación con microorganismos es una alternativa que resulta ser de gran consideración, debido a que algunos de ellos, como los hongos, poseen capacidad bioquímica y ecológica para degradar productos químicos orgánicos que causan daño al medio ambiente, además tienen la capacidad de formar redes miceliales extendidos, cuentan con capacidad de crecer en bajos valores de pH, son utilizados para biorremediación de suelos contaminados que no se pueden biodegradar por medio de otros organismos, son de bajo costo y de fácil acceso [7].

Para la implementación de la biodegradación de plásticos no es necesario contar con muchos recursos, instalación en plantas con radiaciones ultravioleta, máquinas de

alto costo e inversión de reactivos de difícil acceso, por lo que esta alternativa de degradación además de ser efectiva es de gran utilidad y bajo costo.

En este trabajo se propuso estudiar la degradación de una película de PVC sin plastificante utilizando hongos aislados a partir de una muestra ambiental de un suelo que se encuentra expuesto a la resina del material.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 PROBLEMA

De acuerdo con las cifras obtenidas por Mexichem la demanda mundial del plástico se distribuye de la siguiente forma: Norteamérica (14%), Europa (15%), India (7%), Sudamérica con un (6%), Nordeste Asiático (42%), África y Medio Oriente (8%), Sudeste Asiático (5%) [2]. Adicionalmente, en el informe de Acoplasticos en el año 2014 las exportaciones de plásticos en Colombia alcanzaron los 678,7 millones de dólares aportando significativamente a la economía [10]. El uso excesivo de plástico hace que este material se vuelva perjudicial para el medio ambiente y sus habitantes, aunque existen formas de reciclaje, estas no dan solución al problema generado por la sobreabundancia de plástico existente.

La dificultad que se genera con los desechos de PVC está relacionada con el tiempo que tardan en descomponerse, ya que permanecen en el medio ambiente, ocasionando que la vida útil de los rellenos sanitarios disminuya porque se acumulan grandes cantidades de desperdicio. Para intentar buscar una solución a este problema se han buscado estrategias de reciclaje como la reducción en la fuente y la implementación de iniciativas como las 3R: reducir, reutilizar y reciclar, pero estas alternativas no resultan ser una solución eficaz para la contaminación producida por los residuos PVC. [11]

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo General

Comparar la degradación de una película de PVC sin plastificante a partir de hongos aislados de una muestra ambiental de suelo contaminado con resina de PVC.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar morfológicamente las morfoespecies fúngicas, presentes en una muestra de suelo contaminado con resina de PVC, que muestren mayor capacidad de degradación de una película de PVC sin plastificante.
- Estudiar la degradación de una muestra de PVC sin plastificante por medio de una curva de crecimiento de los hongos con mayor actividad degradadora del material.
- Determinar la efectividad de la degradación de una película de PVC sin plastificante midiendo parámetros como la masa, la viscosidad y espectros comparativos UV-VIS e IR.
- Establecer la eficiencia de los hongos encontrados en la muestra ambiental, como una alternativa para la degradación de residuos de escombros y domésticos de PVC.

## 1.3 MARCO REFERENCIAL

### 1.3.1 Marco teórico

Por medio de la polimerización del cloruro de vinilo en estado gaseoso (CVM) resultante de exponer el dicloro etano (cloro y etileno) a altas temperaturas se obtiene un polvo blanco fino e inerte conocido como resina de PVC que es un elemento sintético, el cual está compuesto por cloro en un 57% y etileno en un 43% y cuya densidad es de  $1,330 \text{ g/cm}^3$ , con propiedades conocidas por las industrias como su bajo poder calorífico y la resistencia al ataque de ácidos y bases, aunque no es muy resistente al calor, por lo que necesita de aditivos. [12]

Desde el inicio de las civilizaciones el hombre ha visto la necesidad de crear un material sintético con características superiores a aquellos que se encuentran de manera natural, es por esto por lo que el PVC ha tenido múltiples y accidentales descubrimientos. La resina plástica sintética fue inventada a finales del siglo XIX, cuando se ofrecía dinero a cambio de un material que pudiera reemplazar el marfil en las bolas de billar, así nació un material resultante de la combinación de celulosa, nitratos y alcanfor, que podía moldearse en una sustancia duradera y brillante. [13]

En 1835, Justus Von Liebig genera el monómero de cloruro de vinilo dada la reacción entre el dicloruro de etileno y una solución de hidróxido de potasio. Posteriormente en el año 1872, el alemán Baumann descubrió que la exposición a la luz de un monómero producía un polímero. Después entre los años 1912 y 1915 Klatle y Ostronislensky desarrollaron procedimientos para la fabricación industrial de PVC y las propiedades de polimerización, luego en 1926 Waldo Semon descubrió que el PVC absorbe plastificante y que al ser intervenido puede obtenerse un material

flexible; finalmente en 1938 se inició con la industria del PVC y su fabricación a gran escala.[10]

Las resinas de PVC tienen gran acogida por la industria debido a que se utiliza para la fabricación de tuberías, recubrimientos de cables y paredes, así como suelas de zapatos, hoy en día es común ver gran cantidad de usos para el PVC, debido a que tiene un fácil acceso y es de bajo costo comparado con otros materiales similares. Sin embargo, las preocupaciones acerca de la disponibilidad de recursos naturales todavía impulsan a la innovación en los plásticos y los problemas para la salud han llevado a nuevas regulaciones y acciones preventivas en muchas partes del mundo.[13]

#### 1.3.1.1 Reciclaje de PVC

Reciclaje mecánico: este proceso consiste en la recuperación del flujo continuo de residuos de PVC, el cual se lleva a cabo por medio de selección, trituración y lavado mediante un refinamiento en el cual se obtienen escamas, granzas o micronizado, luego de esto se obtiene un nuevo material que está disponible para ser usado en su segunda vida útil, sin embargo, en muchas ocasiones este nuevo producto no cuenta con la misma calidad que el material virgen. En 2017 en Bogotá se reciclaron cerca de cuatro toneladas de PVC [14]. Para el cumplimiento de la calidad en los productos reciclados del PVC se cuenta con la norma NTC 382 en la cual se establecen las características mínimas que deben tener los materiales de PVC reciclado. [15]

Estudios realizados sobre la importancia del reciclado mecánico del PVC, arroja que es de gran beneficio para el medio ambiente ya que su producto puede ser utilizado en otras aplicaciones. Pero el impacto se genera por la adición de aditivos como el

plomo y cadmio, debido a que al ser reciclados producen una dilución de sustancias que terminan en los vertimientos.

Además, el reciclado mecánico de PVC es un procedimiento que resulta costoso por la desintegración mediante los diferentes procesos como la recogida y separación, por otra parte, el resultado final de este reciclaje no tiene un costo elevado en el mercado tal para equilibrar el dinero invertido en su reciclaje. [16]

Reciclaje Químico: se entiende como la regeneración del material ocasionada por la fractura de la molécula de un polímero del monómero inicial, con el fin de lograr que las moléculas se rompan en unas de menor tamaño, durante estas transformaciones se puede producir HCl que puede ser reutilizado en procesos de purificación o neutralización para obtener otros productos.

Este tipo de reciclaje no resulta ser atractivo para la industria debido a su alto costo, la planta para dicho tratamiento requiere de equipos con precios elevados, además es un método opcional compitiendo con otras opciones como lo son el vertedero o los incineradores. [16]

Para los residuos con un porcentaje mayor del 10% de PVC también se puede usar una combinación entre el reciclaje químico y la recuperación energética que se le conoce como pirolisis y es llevada a cabo a una temperatura superior a 1100 °C, lo que genera una incineración, en este procedimiento primero se recupera el cloruro de hidrógeno y luego la energía [16].

Reciclaje de Vinyloop: es una forma de reciclaje mecánico que permite recuperar PVC que ha sido contaminado con otros elementos, para esta técnica se usa un disolvente biodegradable, donde el PVC se disuelve y posteriormente es recuperado por precipitación, dicho solvente se obtiene por medio de un contenedor de evaporación-condensación, esta tecnología ha sido utilizada recientemente debido a que el PVC obtenido tiene gran calidad [17].

Reciclado de dilución-precipitación: se da por medio de principios físicos ocasionando la destrucción de moléculas de los compuestos base del polímero, este método se desarrolló para compuestos de PVC únicamente para separar los compuestos que conforman el polímero. Se espera que tenga especial aplicación para residuos de cable, revestimientos de suelos entre otros [16].

#### 1.3.1.2 Problemas generados por los residuos por PVC

La principal problemática de los residuos de materiales plásticos está dada por el tiempo que tardan en descomponerse, ya que, al ser tan largo, les permite prolongar su permanencia mucho tiempo en la naturaleza, favoreciendo el agotamiento de la vida útil de los rellenos sanitarios. [6] Adicionalmente, algunos plásticos como el PVC no son de fácil recuperación debido a la cantidad de aditivos que tiene, otro factor influyente en su recuperación es que el producto final tiene restricciones en su uso, de allí que las industrias de PVC tengan un manejo conveniente del reciclaje del material. [18]

Como consecuencia del aumento incontrolable del consumo de plástico se producen residuos de películas de plástico en el suelo que han generado la reducción de su rendimiento, también se encuentran residuos de plásticos flotantes en los ríos y lagos

que se convierten en un factor de riesgo para la pesquería, navegación turística, eficaz funcionamiento de centrales hidroeléctricas, obras públicas entre otros, es necesario tener en cuenta que el daño al medio ambiente que se está provocando también afecta a los recursos naturales no renovables, teniendo en cuenta que el 99% de los plásticos se hacen a base de combustibles fósiles. [19]

Entre los riesgos y problemas más importantes que genera el PVC, se encuentran que los solventes que se usan para su fabricación son aditivos que cuando se liberan afectan el agua y los suelos, en el uso de ventanas se puede presentar contaminación con cadmio y plomo que constituyen riesgos para la salud de los niños, en los incendios pueden formar humos de ácidos que se vuelven corrosivos produciendo dioxinas y furanos y la emisión de componentes orgánicos volátiles.

El PVC contamina durante su ciclo de vida, producción y finalmente como residuo. Por otra parte, el reciclaje de policluro de vinilo es casi nulo y lo poco que se recicla tiene una calidad muy baja por lo que usualmente se utiliza material virgen, los desechos de PVC en su mayoría resultan en los vertederos o incineradores. [14]

De la incineración de resina de PVC se pueden obtener compuestos como el dióxido de carbono, agua y ácido clorhídrico y por la incineración de los aditivos que hacen parte del PVC se originan cloruros de metales, los cuales pueden llegar a ser altamente volátiles en forma molecular, estos pueden salir al medio ambiente por medio de una chimenea en forma de partículas o gases, también se pueden obtener compuestos organoclorados, como las dioxinas, que son lipófilas por lo que se pueden acumular en tejidos grasos y poseen estabilidad térmica, química y biológica. Por lo anterior, las dioxinas son moléculas persistentes en el medio ambiente, el

ingreso de estos elementos al cuerpo humano se da por medio de los alimentos como la leche, queso y carnes, por otra parte, las dioxinas tienen relación con el cáncer y las disfunciones reproductivas afectando el sistema inmunitario. [17]

Otro mecanismo para la disposición final de los residuos de PVC es ser dispuestos en vertederos, en los que se pueden contaminar los lixiviados, en algunas ocasiones estos residuos suelen ser de peso y tamaño muy reducido, por lo que se han propuesto soluciones como mezclarlos con cemento para llevarlos al vertedero, pero siguen siendo igual de tóxicos, en esta opción de disposición se generan derivados clorados y ftalatos que pueden cambiar de forma dependiendo la acidez de las precipitaciones de la zona donde está ubicado el vertedero, favoreciendo la lluvia ácida [19].

Algunas iniciativas que contribuyen a disminuir la problemática son la reducción de la materia prima en la fuente, la reutilización para origen energético y el reciclaje, pero no son la solución. Para poder reprocesar los residuos posconsumo de plástico, es obligatorio que sean eliminadas las impurezas y los diferentes tipos de polímeros deben estar separados, haciendo que el producto reciclado sea más puro, con mayor valor y aceptación en el mercado [6].

### 1.3.2 Marco conceptual

#### 1.3.2.1 Fabricación de PVC

Para la fabricación de PVC, se utiliza etileno y cloro como materia prima, en la antigüedad el cloro era un residuo generado de la sosa, debido a esto se utilizó para la fabricación de PVC, para su producción es necesario clorar el etileno y generar una combustión en ausencia de oxígeno, de allí resulta el monómero de cloruro de vinilo que en seguida será polimerizado para obtener el policloruro de vinilo, es decir el PVC es una secuencia de moléculas de cloruros de vinilo que están unidas entre sí. [18]

De igual forma no basta con obtener el polímero para su buena utilidad, es necesario adicionarle otros compuestos como aditivos, estabilizantes, lubricantes, pigmentos, retardantes de llama, que se clasifican como:

- Estabilizadores térmicos: se usan para retrasar la degradación térmica durante largos periodos de exposición al calor y a la luz son comúnmente usadas las sales de plomo, sales de metales mezclados y organoestánticos, de acuerdo con la aplicación requerida, dentro de los más importantes se encuentra el plomo, específicamente el sulfato de plomo y el fosfito de plomo, que en su mayoría resultan siendo parte de tuberías, perfiles y cables de las viviendas. [9]

Los compuestos organoestannicos como el dioctilestaño que representan un impacto significativo para los medios acuáticos, también son tóxicos para el ser humano, pero sin importar los efectos dañinos que tiene, son empleados en láminas de embalajes, botellas, cubiertas de techos y planchas rígidas de la construcción. [19]

Es necesario darse cuenta de que los impactos más significativos que hacen estos estabilizantes al medio ambiente se dan durante su fase de producción y como residuo debido a que durante su ciclo de vida están retenidos dentro del material y están expuestos al entorno. Mientras que estos elementos al terminar su vida útil en la gran mayoría de veces resultan siendo parte de los vertederos, contribuyendo a la contaminación de lixiviados. [19]

- Lubricantes: pueden ser internos (nivel molecular), donde tienen mayor uso el ácido esteárico, ceras de parafina y estearato cálcico y de plomo o externos (evitan la fricción), comúnmente usados esteres de cera de montana y alcoholes de cadena larga, estos se encargan de reducir la viscosidad, mantener un flujo homogéneo y minimizar el calor generado en el polímero.[20]

- Plastificante: tienen la función de disminuir la fuerza intermolecular, viscosidad de estado fundido y la temperatura de transición, pueden ser sustancias orgánicas que incrementan la flexibilidad, procesabilidad y elasticidad del plástico. Dentro de los más importantes se encuentran los ftalatos, en forma de DEHP (bis(2-etilhexilo)), DIDP (di-"isodecilo) y DINP (di-"isononilo), para satisfacer otros requerimientos de las industrias también son necesarios ablandadores como los adipatos, trimelitados, organofosfatos y aceite de soja expoxidado [20].

Por otra parte, dentro del grupo de los aditivos, también se encuentran: modificadores encargados de evitar la ruptura del polímero, absorbedores de UV que evitan la excitación térmica, deslizantes y antiestáticos usados para evitar la fricción y reducen las cargas estáticas, espumantes que reducen la densidad, bioestabilizadores que

evitan el crecimiento de microbios, bacterias y hongos, finalmente los pigmentos que dan identidad y decoración al material [20].

Luego de que estos aditivos son elegidos cuidadosamente se pueden integrar a la resina vinílica de tipo suspensión para obtener una mezcla seca, la cual puede ser modificada mediante procesos de inyección, extrusión, entre otros; o mezclar con la resina vinílica de tipo emulsión para formar un plastisol, que posteriormente puede ser transformado mediante recubrimiento, vaciado, estampado entre otros [20].

Algunos de los procesos a los que se somete el PVC, que le brindarán propiedades específicas requeridas según el uso que se le va a dar son:

- Calandreo: el compuesto de PVC se hace pasar por un sistema de rodillos donde se forma una lámina por rotación y compresión, usualmente tiene un espesor de 0.2 mm o menos [20].
- Extrusión: el PVC en forma de polvo o pellets es calentado y plastificado por medio de un tornillo sin fin hasta un estado fluido, este es forzado bajo presión y luego adquiere apariencia rígida o flexible de acuerdo a lo solicitado [20].
- Inyección: consiste en un tornillo sin fin donde el PVC fundido es empujado hasta llegar a un molde que debe ser llenado y dar una forma específica [20].
- Soplado: se usa para la elaboración de formas huecas, como lo son botellas o contenedores, se da por medio de la presión que ejerce el aire en las paredes de la

proforma donde está contenido [20].

- **Compresión:** consiste en colocar el plástico en un molde caliente donde el material se ablanda y adquiere la forma del molde que lo contiene [20].
- **Termoformado:** se calienta una lámina que ya está extruida para lograr que esta se reblandezca y pueda lograr la forma de un molde por medio de vacío o presión. [20]
- **Rotomoldeo:** se utiliza para la fabricación de formas huecas donde se encuentran los plastisoles y organosoles, donde a un molde frío se le coloca el plastisol y se cierra de una manera hermética, esto se introduce a un horno donde adquiere la forma a través de calor y rotación del molde. [20]
- **Lecho Fluidizado:** es un proceso que se utiliza para recubrir objetos metálicos a través de la energía calorífica para conseguir la adherencia al material y lograr una película de protección. [20]
- **Inmersión:** consiste en utilizar moldes precalentados en un polímero líquido, durante este proceso el material se adhiere al molde en forma de gel, posteriormente se retira el molde que queda recubierto con una capa del polímero y se obtiene un curado térmico. [20]

#### 1.3.2.2 Tipos de PVC

El PVC se produce en forma de resina y se puede obtener por medio de cuatro procesos diferentes de acuerdo a los cuales clasifica en: suspensión, emulsión, masa

y solución. Aunque las más usadas en la industria son las de tipo suspensión y emulsión. [20]

- Suspensión: se lleva a cabo en agua debido a que el cloruro de vinilo y el policloruro de vinilo obtenidos son insolubles en agua. Posteriormente se disuelve alcohol polivinílico que actúa como agente de suspensión y tiene como función cubrir la superficie de las gotas del polímero y evitar que se peguen. En este proceso se obtienen tamaños de partículas entre 40 a 200 micras. El producto de esta polimerización se usa en procesos de extrusión, calandreo y moldeo [20].

- Emulsión: se diferencia de la polimerización anterior porque en este se debe añadir un emulsificante que comúnmente es un jabón o detergente, cuando el monómero se emulsifica, en otras palabras, se forman gotas de un tamaño tan reducido que no pueden ser vistas microscópicamente, estas gotas forman un látex de apariencia lechosa, este se debe precipitar para romper la emulsión. Finalmente se lava para darle propiedades de adsorción de aditivo, el tamaño de partícula que resulta es 1 a 10 micras y la resina resultante se utiliza para la producción de plastisoles. [20]

### 1.3.2.3 Hongos

La palabra “hongos” proviene del griego “mikes” que significa “setas”. Tournefort, en el siglo XVII, aplicó la palabra “fungi”, que significa florecimiento de la tierra [21] y es el nombre del reino al que pertenecen, éste incluye hongos, setas, royas, trufas, mohos y levaduras. Existen acerca de 1,5 millones de hongos y se han descrito aproximadamente 100.000 especies. Forman parte del súper reino o dominio Eukarya, un grupo independiente con una cantidad establecida de rangos al igual que las plantas y animales. [21]

Actualmente, no existe una clasificación aceptada a nivel mundial, sin embargo, en este proceso, es importante tener en cuenta características microscópicas, taxonómicas y reproductivas de los hongos. “Como todos los seres vivos, los hongos se nombran de acuerdo con la nomenclatura de Linneo. Por tanto, cada individuo se denomina, en primer lugar, con el nombre del género al que pertenece y el segundo término indica la especie. Ej.: el champiñón cultivado se denomina *Agaricus* (género) *bisporus* (especie).” [22] En general, la taxonomía de los hongos está dada jerárquicamente, en donde la característica más amplia es el reino y el inferior y más específico es la especie.

Los hongos son organismos de alimentación heterótrofa que tienen la capacidad de sintetizar enzimas tanto dentro como fuera de la célula, con la capacidad de cambiar sustratos de tipo orgánico que realizan la oxidación de compuestos inorgánicos, poseen la capacidad bioquímica y ecológica para degradar químicos orgánicos de origen ambiental y disminuir el riesgo asociado con metales, metaloides y radionucleoides, ya sea por modificación o influencia de la viabilidad química. Además, la habilidad de los hongos de formar redes extensas de micelios, la baja especificidad de las enzimas catabólicas y la independencia de usar contaminantes como sustrato de crecimiento hace que sean muy buenos para remediación biológica de nichos ambientales. [23]

Su interface con el ambiente está dada por la membrana lipídica, la mayor parte de su peso seco se da gracias a la pared celular, que está conformada por polisacáridos como quitina, celulosa y quitosán. Los hongos pueden vivir en el suelo, madera en descomposición y aguas dulces y marinas. [24]

Debido a que son organismos heterótrofos, no pueden sintetizar compuestos complejos a partir de  $\text{CO}_2$ , viven de la degradación en sustancias simples de materia orgánica mediante un proceso de secreción enzimática que les permite absorber los nutrientes necesarios para su crecimiento, tales como oxígeno, hidrógeno, carbono, nitrógeno, hierro, calcio, cobalto, cobre, manganeso y molibdeno. [24]

Mediante el metabolismo secundario, se producen toxinas, antibióticos y pigmentos y su reproducción puede ser sexual, asexual o parasexual, en la que se da paso la variabilidad genética sin que haya reproducción sexual [24].

#### 1.3.2.4 Técnicas para medir la degradación

- **Análisis Infrarrojo**

Las observaciones del espectro infrarrojo se dan entre 2500 y 16000 nm, en esta zona se pueden presentar excitaciones de las transiciones vibraciones de las moléculas a través de estiramientos y flexiones de los enlaces. Al entregar energía adecuada a estos enlaces se comportan como resortes, favoreciendo las vibraciones del sistema. [25]

De esta manera, al someter una molécula a energía radiante se van a aumentar las vibraciones naturales de los enlaces a una frecuencia específica, para el caso del PVC puro libre de aditivos, plastificante entre otros, es así que en el espectro infrarrojo se podrán observar los picos más elevados en el enlace del grupo de los hidrocarburos (C-H) donde se reporta una longitud de onda  $2900 \text{ cm}^{-1}$ , por otra parte se encuentra el pico dado por el enlace (C-Cl) del grupo alcohólico que reporta una longitud de onda entre  $834$  y  $847 \text{ cm}^{-1}$ , también se observa el enlace entre (C-C) con longitud de onda de  $100 \text{ cm}^{-1}$  [26]. Sin embargo, para el caso de otros espectros de

PVC con aditivos se puede observar otros picos de absorción con otros grupos funcionales.

Para el caso del PVC, se realizó una comparación entre los espectros obtenidos de las muestras de lámina durante la prueba de degradación, con el espectro del material virgen como la que se muestra a continuación, que se encuentra en una región entre los 4000 y 400  $\text{cm}^{-1}$ , teniendo en cuenta las bandas de enlaces más importantes entre carbonos que puedan llegar a observar [26].

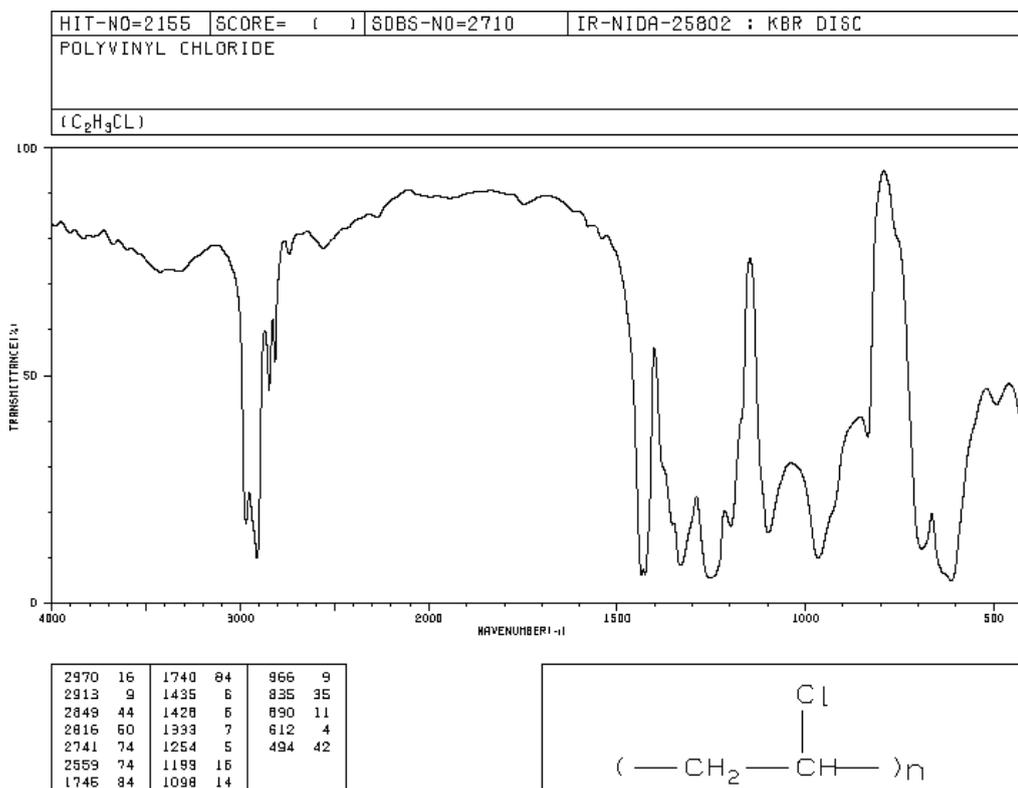


Ilustración 1. Espectro IR de PVC

- **Método de Mohr**

Para comprobar la degradación de PVC, se tituló el sobrenadante obtenido por medio del método de Mohr, este utiliza un ion cromato como indicador para precipitar como cromato de plata ( $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ ) para identificar un color rojo ladrillo, de esta reacción se espera que los iones cloruro hayan reaccionado, la solución necesita ser neutra, pH 7-10, el pH bajo aumenta la solubilidad de  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$  debido a que la concentración de iones cromato disminuye, al reaccionar con los iones hidronios para determinar el punto de final de titulación. [27]

- **Conteo de esporas**

Durante la curva de crecimiento, se realizará cada siete días el conteo de esporas, por triplicado usando la cámara de Neubauer para verificar la cantidad de esporas presentes en el sobrenadante.

- **Masa ganada por el hongo**

Se verifico la masa ganada por el hongo por medio de la diferencia de masa e un papel filtro (el cual se pesó previo a ser usado) en el cual se ubicó el crecimiento del hongo macroscópico y pasados unos días se volvió a pesar para saber la masa ganada

- **Masa pérdida de la película de PVC**

Se peso la película de PVC antes de ser expuesta a la acción del hongo y pasado el tiempo de análisis de repitió este proceso para comprobar la masa pérdida de la lámina de PVC.

### 1.3.3 Marco referencial

#### 1.3.3.1 Situación actual del PVC

Según la base de datos del DANE en la Encuesta Anual Manufacturera del año 2013, la generación de productos de plástico en Colombia está dada por 662 establecimientos, de los cuales, 63,7% cuentan con un rango de 1 a 49 trabajadores, 27,9% entre 50 y 199 y el 8,3% más de 200, siendo Bogotá, Antioquia y el valle del Cauca las principales regiones en las que se pueden encontrar con un total de 513 de éstos establecimientos pero con una activa participación en otras regiones como Atlántico, Bolívar, Cauca, Cundinamarca y Santander. [18]

Dicha producción se clasifica en dos grupos, el primero de formas básicas de plástico con un 26% del total de los establecimientos y un 74% de artículos de plástico n.c.p. (no clasificados previamente). La producción bruta de productos de plástico es de \$ 7.541 millardos (siete mil quinientos cuarenta y un millón de pesos) y el valor agregado es de \$ 2.943 millardos (dos mil novecientos cuarenta y tres millones de pesos). Lo anterior quiere decir que en el año 2014 Colombia evidenció una alta producción del material plástico que genera alzas en el crecimiento del PIB del país, adicionalmente es un sector que genera una amplia cantidad de empleo [18].

Los plásticos en formas primarias aumentaron las ventas externas de 975 millones de dólares en 2012 a 1.020 (4,6%) en 2013 y a 1038 (1,7%) en 2014. Los productos de plástico que siguen en cuantía en las ventas externas, con valores sucesivos de 574 y 585 millones de dólares en los años 2012 y 2013 - 2014, tuvieron un incremento del 2% en 2013 y el valor se mantuvo en el año siguiente. [18]

Las exportaciones de las formas básicas de plástico (películas, láminas, perfiles y tubos, entre otros) crecieron un 7% pero cayeron 6,6% en 2014. Por el contrario, los artículos plásticos diversos registraron una contracción del 4,6% en el valor de los despachos al exterior en 2013 y un aumento del 9,6% en 2014. En conclusión, en el transcurso de 2012 a 2013 los montos en dólares de las exportaciones colombianas de productos de plástico se ampliaron, nivel que se mantuvo en 2014. [18]

Las importaciones en valor FOB (valor de venta de los productos en su lugar de origen más los gastos necesarios para hacer llegar la mercancía hasta la aduana de salida) realizadas por Colombia de productos de plástico en el trienio 2012 a 2014 muestran un comportamiento ascendente. Los plásticos en formas primarias han representado, en el promedio anual del trienio el 29% de los totales importados, la gran mayoría de las materias primas utilizadas para polímeros y resinas fabricados en el país son de origen extranjero.

Las importaciones de productos de plástico durante el lapso de 2012 a 2014 registran magnitudes absolutas, en su orden de: 885 en 2012, 934 en 2013 y de 1.009 en 2014. El valor FOB de las compras externas de productos plásticos se distribuye en promedio así: el 52% en formas básicas de plástico y el 48% en artículos diversos de plástico; ambas clases, luego de aumentos del 5,1% y 5,9% en 2013, registran otro incremento en 2014 del 9,9% en las formas básicas y del 6,2 en las otras manufacturas, para llegar a los montos correspondientes de 532 y 477 millones de dólares FOB. [18]

En el 2013, las importaciones de los plásticos en formas primarias crecieron 2,7% y en 2014 su expansión fue del 13,9%. Así, las compras externas de materiales para la

industria de transformación de plásticos registraron valores FOB crecientes en el trienio [18].

En términos absolutos, las adquisiciones colombianas de productos de plástico en otros países registran valores anuales crecientes en el trienio, con aumento del 14% en 2014 en comparación con la cifra del 2012. (Informe 2015- 2016) [18].

### 1.3.3.2 Importancia del PVC

El plástico ha tenido un aumento del 5% en la producción global, en los últimos 20 años ha llegado a más de 300 millones de toneladas anuales, que en su mayoría son utilizados para envolver alimentos, dentro de los plásticos el PVC ocupa el segundo lugar en volumen de producción de todos los termoplásticos, su bajo costo hace que se vuelva una mercancía versátil y de fácil acceso, de acuerdo con esto se generan problemas en la eliminación posconsumo del PVC, debido a que la industria encargada de su fabricación tiene un crecimiento continuo. La Unión Europea lanzo un plan de gestión para evitar el uso de aditivos en el PVC y eliminar el cadmio y los estabilizantes de plomo. [28]

Los principales usos que tiene el PVC son en tuberías de distribución y cañerías de agua potable, así como en el alcantarillado, en ventanas, persianas, cables e instalaciones eléctricas como recubrimiento, tomas de corrientes e interruptores, enchufes, cubiertas impermeabilizantes, aislación de espuma plástica, pisos vinílicos, muebles y tapicería. [20]

En la industria de los plásticos, el PVC tiene gran acogida debido a su amplia oferta de aplicaciones, gran versatilidad, buena durabilidad y una amplia campaña de

procesabilidad; esto ha generado que se convierta en un material deseado en industrias como la automotriz, construcciones textiles entre otras. Debido a que el excesivo uso del PVC ocasiona problemas al medio ambiente y a la salud humana, es necesario crear regulaciones ambientales, de salud en el trabajo, y en los procesos de producción para evitar la afectación al medio ambiente y el bienestar de los seres humanos [16].

Un caso concreto de la preferencia para el uso de PVC se da en los conductos de las aguas residuales, donde en el mercado se encuentra el precio de este material un 30% más económico que el de otros materiales como el hierro galvanizado o la cerámica, por otra parte, una desventaja que tiene el PVC en tuberías es que puede sufrir rupturas, debido a esto su vida media se reduce entre 10 y 15 años aproximadamente [14].

Las crecientes preocupaciones en torno a los plásticos derivados de combustibles fósiles representan una oportunidad para rediseñar plásticos a lo largo de la cadena de suministro e impulsan una nueva generación de productos al mercado. Teniendo en cuenta esto se están implementado nuevas tecnologías para la fabricación de plásticos, una idea trata de diseñar plásticos biodegradables, el cual debe contar con un bajo impacto ambiental y de la salud humana pero no solo en su fase de producción sino también durante su uso, en este se debe reducir el uso de productos químicos tóxicos, metales pesados en los aditivos, plastificantes en reducir el impacto que genera el ciclo de vida de los polímeros. [29]

### 1.3.3.3 Disposición de PVC

La cantidad de residuos de PVC está dada a partir de la duración que estos tienen en el medio donde son usados, en algunas ocasiones estos pueden tardar hasta 30 años en tuberías y perfiles, alcanzaron un pico de fabricación a mediados de los años 60 [19].

Incineración: los residuos de PVC se incineran junto a los residuos urbanos y hospitalarios que también tiene aplicaciones de PVC, como resultado de la combustión del polímero se obtiene HCl gaseoso, los gases generados por este proceso deben ser neutralizados antes de ser emitidos a la atmósfera ya que están clasificados como residuos peligrosos por su contenido de metales pesados, dioxinas y exceso de agente neutralizante (que promueve el incremento en los costos de funcionamiento de las incineradoras), por esta razón también aumenta la producción de residuos de limpieza de los gases de combustión un 37%. [19]

Al quemar residuos con PVC, incrementa la cantidad de sales lixiviables como cloruro de calcio, sodio y potasio. Es importante mencionar que también se le atribuyen las mayores cantidades de cloro en las incineradoras, por lo cual, es posible que aporte a la formación de dioxinas al ambiente y se abra paso a la corrosión de los equipos ya que hay factores termodinámicos como la presión de vapor y la eficiencia energética (que es menor para PVC por su alto valor calorífico) que podrían verse afectados por la presencia de cloro en los residuos. [19]

Eliminación en vertederos: Los vertederos deben cumplir una serie de normas técnicas encaminadas a proteger los recursos como el agua y el suelo por medio de la eliminación de lixiviados, impermeabilización del fondo y disminuir las emisiones

atmosféricas de gases residuales, teniendo en cuenta parámetros como temperatura, humedad, oxígeno y microorganismos presentes según los materiales vertidos. [19]

Según investigaciones sobre PVC rígido y blando bajo tratamiento biológico y pruebas microbiológicas, éste es un material resistente al enterramiento y vertederos, sin embargo, se han evidenciado daños en películas finas de este material en condiciones aeróbicas. [19]

Acerca de los estabilizantes en vertedero, se genera una separación de sus componentes como plomo en cables de PVC y también es posible que se presente formación de dioxinas y furanos durante eventos accidentales como incendios en los vertederos. [19]

#### 1.3.3.4 Avances para degradar PVC

En la literatura no se encuentran muchos estudios sobre la degradación de PVC a partir de microorganismos. Sin embargo se encuentran muchos artículos que estudian la degradación físico química de este material, uno de estos fue realizado en 1984 por Juan J. Ortega, Manuel Blanco y Angel Cuevas expusieron láminas de PVC plastificado utilizado para la impermeabilización en obras públicas a envejecimiento acelerado por radiaciones UV-vis con inmersión en agua (proceso de reacciones homolíticas que contribuyen a la degradación por deshidrocloración de la macromolécula), observando cambios en la composición del material y su estructura microscópica después de las 3.000 horas de experimentación a 70 °C; entre los resultados obtenidos, se pueden resaltar los siguientes: la variación por alargamiento de la lámina no preparada para la intemperie fue de 27%, el cambio en los componentes del material para la lámina no preparada para la intemperie

corresponde a una disminución en el plastificante del 26% y un aumento de filler y resina de 2 y 5% respectivamente. Finalmente, en el análisis microscópico se logró mediante microscopía electrónica de barrido, que permitió comprobar los resultados mencionados anteriormente de las propiedades mecánicas y composición mediante la verificación del proceso degradativo. [30]

Entre los pocos estudios de degradación de PVC a partir de microorganismos, uno de los que muestra los mejores resultados es el trabajo publicado en 1999 por Kirbas, Guner y Keskin, quienes realizaron estudios para degradar PVC por medio de hongos de pudrición blanca, identificando tres especies de hongos los cuales fueron *Pleurotus*, *Poliporus Versicolor* y *Phanerochaete Chrysosporium*, para determinar la eficacia de la degradación realizaron la medida de la biodegradación el día 30, donde encontraron que el que reporta mejor porcentaje de degradación es la especie *Poliporus Versicolor* con 19,32%, por otra parte esta especie forma una disminución del 82,15% de los enlaces CH mientras que las otras especies reportan porcentajes menores al 13,17% [8].

En 2012, Muhammad Ishtiaq Ali, Safia Ahmed, Geoff Robson (et. al.) probaron la degradación por vertedero mediante el aislamiento de diferentes hongos del suelo, realizando un aislamiento con láminas de PVC como única fuente de carbono, en un medio líquido a 30 °C y 150 rpm. Al finalizar la séptima semana, se observó un aumento en biomasa de 2,57 mg producida, según un análisis del 99% de coincidencia, por las especies *Chrysosporium phanerochaete*, *Lentinus tigrinus*, *Aspergillus niger*, entre otras. Las películas de PVC mostraron decoloración de blanco a marrón después de pasar los 10 meses de enterramiento, cambios físicos por la

aparición de anillos hexagonales sobre su superficie además de un desplazamiento en sus picos de 2cm aproximadamente. [9]

En este mismo año, en India, se probó la biodegradación de PVC mediante cepas microbianas, ya que desde años atrás se ha confiado en los microorganismos como un buen recurso para la eliminación del plástico residual, las láminas de PVC fueron enterradas en el suelo bajo condiciones de laboratorio, durante 16 semanas a 30 °C con diferentes fuentes microbianas, al pasar este tiempo se observó que sólo una cepa fue capaz de crecer sin la presencia de sustratos, únicamente en agar de PVC, tres de las cepas utilizadas fueron capaces de liberar cloruro de las películas. La cepa que mayor éxito mostró en la degradación fue reconocida como *Micrococcus luteus*, un organismo aeróbico con buen crecimiento entre 28 y 37 °C, no mostró hidrólisis en el almidón, hubo un 7,5 de crecimiento en el cloruro de sodio, según el análisis espectroscópico, se presentó un crecimiento bacteriano mediante medición óptica en el medio de cultivo de 600 nm. [31]

## 1.4 METODOLOGIA

Los resultados de esta investigación se ven influenciados por datos cualitativos dado que se analizarán características físicas que demuestren parámetros de degradación sobre las películas de PVC y cuantitativos debido a que se evaluarán resultados de degradación a partir de las curvas de crecimiento obtenidas, por esta razón se presenta un enfoque mixto que da lugar a cuatro etapas que se presentan a continuación:

### 1.4.1 Primera etapa: caracterización de especies fúngicas encontradas

Para la realización de esta etapa, se tomaron muestras de suelo contaminando con resina de PVC, de una empresa dedicada a la fabricación y comercialización de productos a partir de resina de PVC, de un suelo que ha estado expuesto a esta por más de 20 años, los apiques para estas muestras fueron de 50 cm de profundidad y su distribución fue en cinco puntos diferentes de un terreno de 6m<sup>2</sup> de área, aproximadamente, en forma de zigzag ubicando un punto cada 3 metros. Luego, estas muestras se reunieron en una sola muestra y se tamizaron para homogenizarlas y de allí se tomó la muestra de suelo de la que se hizo el cultivo.

La anterior muestra de suelo se sembró en un medio de cultivo de enriquecimiento el cual contenía 0,025 g de K<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0,0625 g de MgSO<sub>4</sub>\*7H<sub>2</sub>O, 0,0125 de CaCl<sub>2</sub> (2H<sub>2</sub>O), 0,0625 g de NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 0,0125 g de extracto de levadura, 1,25 g de glucosa, 10 g de suelo y 1 g de resina de PVC en 1 L de agua destilada. Este medio permaneció cinco semanas en incubación a 25°C y a 150 rpm.

Pasadas las cinco semanas, se hicieron diluciones seriadas hasta  $1 \times 10^{-3}$  del medio de enriquecimiento como se muestra en la ilustración 2. Luego, se tomaron 100  $\mu\text{L}$  de cada dilución y se sembraron por triplicado en medios de cultivo czapek, extracto de malta y PDA, los cuales se prepararon como sigue:

- PDA: 39 g de PDA y 10 g de agar para 1 L de agua destilada.
- Extracto de Malta: 30 g de extracto de malta, 3 g de peptona y 20 g de agar para 1 L de agua destilada.
- Czapek: 2 g de  $\text{NaNO}_3$ , 0,50 g de  $\text{KCl}$ , 0,50 g de  $\text{MgS}$ , 0,01 g de  $\text{FeSO}_4$ , 0,1 g de  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 30 g de sacarosa y 12 g de agar agar para 1L.

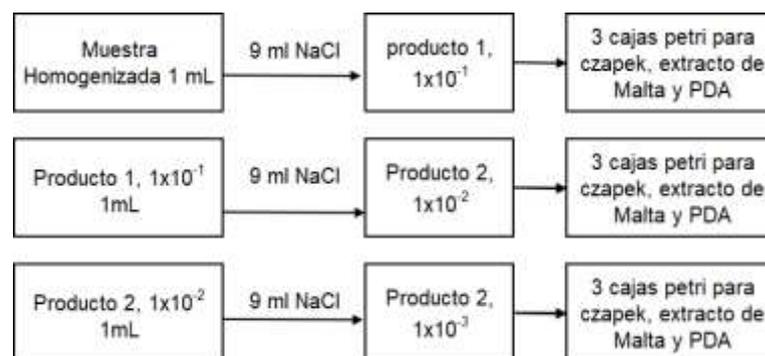


Ilustración 2. Proceso de dilución de la muestra homogenizada

Fuente Autores 2018

Luego de dos semanas, se hizo un seguimiento de las cajas petri para hacer un conteo y análisis macroscópico de las especies presentes. De estas cajas se repicaron las morfoespecies fúngicas para aislarlas y posteriormente hacer la caracterización microscópica, la cual se llevó a cabo por medio de tinción con azul de lactofenol para evidenciar en el microscopio las características morfológicas de cada especie y hacer la caracterización por comparación usando las claves de Domsch y Gams. [12]

#### 1.4.2 Segunda etapa: pruebas preliminares de degradación

Para las pruebas preliminares se prepararon películas de PVC a partir de 0,2 g de resina de PVC y 10 ml de tetrahidrofurano [9] y luego fueron sometidas a 150°C por una hora (Películas C), mientras que a otras no se les realizó ningún tratamiento térmico (Películas SC) [33].

Luego se hicieron pruebas de degradación de PVC con ocho de las morfoespecies resultantes en un medio mínimo de sales, en el que se ubicó una película de PVC de 6,2 cm x 2,5 y el respectivo hongo. Este medio se preparó con 1 g de  $K_2HPO_4$ , 0,2 g de  $KH_2PO_4$ , 1 g NaCl, 0,02 g de  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ , 0,005 g de ácido bórico, 1 g de  $NH_4SO_4$ , 0,5 g de  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ , 0,01  $CuSO_4$ , 0,01 g  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ , 0,01 g  $MnSO_4$  y 0,01 g de  $FeSO_4$  para un litro de agua destilada. Las películas de PVC que fueron utilizadas para las pruebas se lavaron con alcohol etílico y agua destilada previamente. Luego se incubaron a 30°C y a 150 rpm entre 4 y 6 semanas, al finalizar este tiempo, se procedió a revisar las modificaciones macroscópicas sobre las películas, teniendo en cuenta la formación de agujeros y grietas, cambios en el color, desarrollo de microorganismos sobre la superficie y espesor de la película. Todas las pruebas se hicieron por triplicado y con blancos para el hongo (pruebas con medio mínimo de sales con el hongo y sin la película) y para la película (pruebas con medio mínimo de sales con película y sin hongos)

Adicionalmente, a cada hongo y película se le realizó el siguiente análisis: comparación del crecimiento que adquiere cada hongo con respecto al blanco inicial, para hacer esto, se tomó el hongo dispuesto sobre la película, se filtró, se secó a 70°C durante 72 horas y se pesó. Además, se compararon los espectros IR de la película

al inicio y al final de la prueba, en un rango de longitud de onda de 4000 y 400  $\text{cm}^{-1}$ . Finalmente, se determinó la masa de cloruro en el sobrenadante obtenido de la filtración usando como solución titulante  $\text{AgNO}_3$ , como indicador  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$  con el cual se obtuvo un producto de color rojo ladrillo; esta titulación se comparó con la obtenida de los blancos del experimento para encontrar si había diferencia.

De acuerdo con los resultados obtenidos se seleccionaron las dos especies con mayor éxito en la degradación de las películas de PVC que sirvieron como foco de estudio para la etapa final.

#### 1.4.3 Etapa tres: curvas de crecimiento de los dos aislamientos fúngicos con mejores resultados

Para esta etapa se hicieron cultivos monospóricos de los dos aislamientos escogidos, estos fueron sembrados por triplicado, se tomó como base soluciones de concentración 1 espora de cepa por cada 1  $\mu\text{l}$  de solución. Luego se realizó la siembra en cajas Petri en extracto de malta, pero también en tubos de vidrio con caldo de agar como otra alternativa para obtener el cultivo para el montaje de las curvas de crecimiento. Pasados 4 días se realizó el montaje de las curvas de crecimiento en tubos falcón con el medio mínimo de sales anteriormente mencionado junto con las películas de PVC previamente preparadas, los tubos se pusieron en un agitador orbital a 150 rpm y a  $23^\circ\text{C}$  [34]. Este experimento también se hizo por triplicado y con los blancos señalados en las pruebas preliminares.

Se tomaron datos cada 7 días durante 15 semanas, registrando la masa ganada por los hongos, también se tomaron los espectros infrarrojos por FTIR de cada película

expuesta a las dos cepas, se tituló el sobrenadante, se verificó la masa perdida por la película y se hizo el conteo de esporas usando la cámara de Neubauer.

#### 1.4.4 Etapa cuatro: análisis estadístico de los datos

Para analizar los resultados obtenidos en las pruebas preliminares, inicialmente se hizo un análisis de varianza (ANOVA), a pesar de ello en esta prueba estadística, no se encontraron desigualdades significativas en el tratamiento térmico probado, es por esto que se realizó una gráfica box plot como alternativa para observar las diferencias entre un tratamiento y otro. En lo relacionado con los resultados de las pruebas preliminares se usó un diagrama de barras en el cual se identificó la especie que logró mayor masa. Finalmente, para las curvas de crecimiento se usó la prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales para evidenciar diferencias entre pares de semanas durante el estudio.

#### 1.4.5 Etapa cinco: análisis del ciclo de vida de PVC para determinar la eficiencia de los hongos

Se hizo una revisión general acerca de cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto dentro de los cuales se encuentra la producción, la transformación, los usos, fin de vida, y eliminación o recuperación y se mencionaron las características propias de este proceso.

Se realizó una búsqueda bibliográfica acerca de un estudio realizado en el cual se muestran resultados acerca de un proceso de degradación de PVC, para este caso se tomó como referencia “el estudio de una vía de reciclaje de policloruro de vinilo (PVC) post- consumo”, realizado en la Universidad de Santander y sirvió como base

para analizar los resultados allí obtenidos y poder establecer una posible comparación con los resultados que se lograron en el estudio del presente documento.

## 2. RESULTADOS

### 2.1 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA

Para el desarrollo de este estudio, inicialmente se tomaron muestras de suelo, las cuales sirvieron como fuente de las especies fúngicas de las cuales se analizó su capacidad de degradación.

#### 2.1.1 Toma de muestra

En la ilustración 3, se observan los 4 apiques que se realizaron en el suelo de la empresa de fabricación y comercialización de productos de PVC, de donde se tomó aproximadamente 20 g de suelo en cada apique, para obtener en total 120 g de suelo, la distancia entre cada uno de ellos fue de un 1 metro y se tomaron en forma de zigzag.



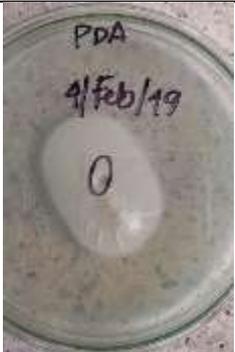
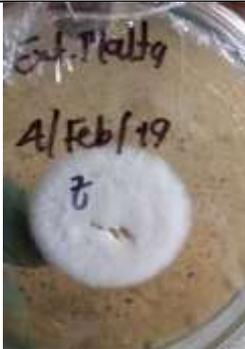
Ilustración 3. Toma de muestra de suelo

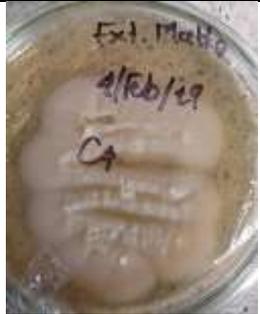
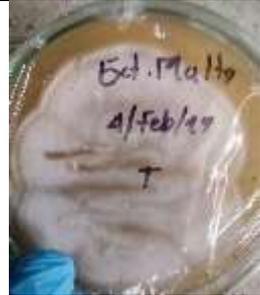
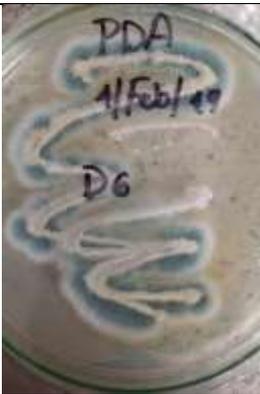
Fuente: Autores 2017

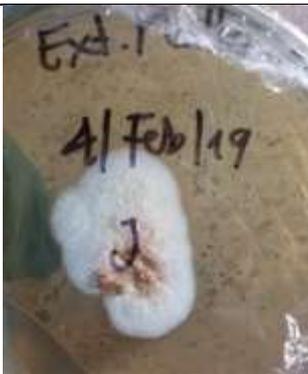
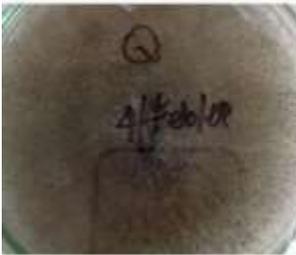
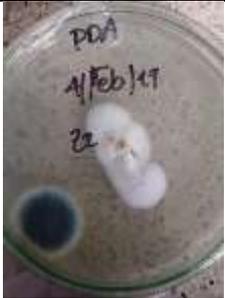
#### 2.1.2 Especies aisladas

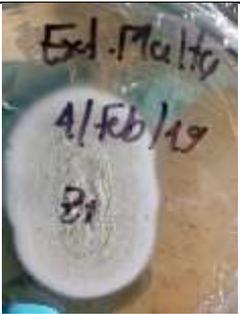
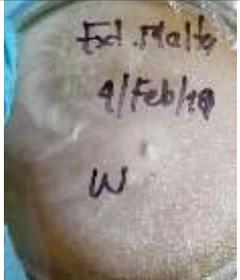
Se obtuvieron 20 especies fúngicas luego de realizar el procedimiento para el aislamiento de las morfoespecies de la muestra de suelo, en la tabla 1, se muestran

dichos aislamientos, el código de identificación, la descripción macroscópica (anverso y reverso) y su fotografía dentro de la caja de Petri.

Código de identificación	Descripción macroscópica		Fotografía
	Anverso	Reverso	
X	Colonia circular de rápido crecimiento, textura algodonosa, color blanco	Blanco, sin embargo, se observa en el centro un color naranja.	 A Petri dish with a white, cottony circular colony. The lid is labeled 'Exp. Petri', '4/Feb/19', and 'X'.
O	Colonia circular de textura líquida, no se extiende a lo largo de la caja Petri, color blanco	Blanco suave	 A Petri dish with a small, white, liquid-like circular colony. The lid is labeled 'PDA', '4/Feb/19', and 'O'.
Z	Colonia circular de color blanco con textura algodonosa	Color blanco, se observa en el reverso un color naranja fuerte	 A Petri dish with a white, cottony circular colony. The lid is labeled 'Exp. Petri', '4/Feb/19', and 'Z'.
E10	Colonia alargada se encuentra de color rojo en el centro con una mancha de color blanco en el	El reverso es de color amarillo claro, en el centro se observa un	 A Petri dish with an elongated colony showing a red center and a white spot. The lid is labeled 'Exp. Petri', '4/Feb', and 'E10'.

	centro, el borde es de color blanco y textura algodonosa	color morado fuerte	
C4	Colonia de forma irregular de textura liquida sin forma definida	Color blanco sin forma regular	
T	Colonia sin forma definida de color blanco, se observa espacios dentro de ella	Color blanco	
AB	Colonia de forma irregular que forma pequeños círculos a lo largo de la caja, es de color verde	Café claro amarillento	
D6	Colonia de textura liquida sin forma regular	Color rosa	

J	Colonia de forma ovalada de color blanco, en el centro se observa color naranja es de textura algodonosa	Color blanco, pero en el centro se observa un color naranja	 A Petri dish containing a white, cottony colony. The colony is oval-shaped with a distinct orange center. Handwritten text on the lid reads "Ext. 1" and "4/Feb/19". The letter "J" is written on the colony.
Z9	Colonia que ocupa gran parte de la caja Petri, tiene forma circular y textura algodonosa	Color blanco	 A Petri dish showing a large, circular, white, cottony colony covering most of the surface. Handwritten text on the lid includes "Ext. Malto" and "4/Feb". The number "39" is written on the colony.
V	Colonia circular que muestra textura algodonosa, es de color blanco	Color blanco	 A Petri dish with a circular, white, cottony colony. Handwritten text on the lid says "Ext. Malto" and "4-Feb/19". The letter "V" is written on the colony.
Q	Colonia de textura algodonosa, es de color café y ocupa toda la caja Petri	Color café claro	 A Petri dish containing a light brown, cottony colony that covers the entire surface. Handwritten text on the lid includes "Q" and "4/Feb/19".
Z2	Colonia de color blanco, de forma ovalada	Color rosa pálido	 A Petri dish with a white, cottony, oval-shaped colony. Handwritten text on the lid includes "DCA", "4/Feb/19", and "Z2".

Z1	Colonia ovalada, tiene textura de gotas y es de color perla en algunas partes se observa color lila.	Color blanco	 A Petri dish containing a white, oval-shaped colony with a glistening, drop-like texture. The dish is labeled "Ecol. Maltito", "4/Feb/19", and "Z1".
M	Colonia circular de color blanco, presenta textura algodonosa	Color blanco	 A Petri dish showing a circular, white, cottony colony. The dish is labeled "PDA", "4/Feb/19", and "M".
D3	Colonia circular de textura algodonosa, es de rápido crecimiento color negro y en el centro color blanco	Negro	 A Petri dish with a circular colony that is mostly black with a white center. The dish is labeled "PDA", "4/Feb/19", and "D3".
W	Colonia de color blanco, es de forma circular, ocupa gran parte de la caja Petri	Color blanco	 A Petri dish with a large, circular, white colony covering most of the surface. The dish is labeled "Ecol. Maltito", "4/Feb/19", and "W".
S	Colonia de forma ovalada, tiene textura de líquido, se observan	Color blanco	 A Petri dish with an oval, white, liquid-like colony. The dish is labeled "Ecol. Maltito", "4/Feb/19", and "S".

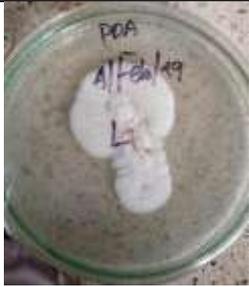
	protuberancias dentro de la colonia		
L	Colonia de color blanco, en el centro presenta color rosa, textura algodonosa	Color blanco	 A petri dish containing a white, cottony fungal colony. The center of the colony is pinkish. The dish is labeled 'PDA', '11 Feb/19', and 'L'.
F	Colonia circular de color blanco y rosa en los bordes	Amarillo	 A petri dish containing a circular fungal colony with a white center and pinkish edges. The dish is labeled '09 enero 2019' and 'F'.

Tabla 1. Hongos aislados de la muestra de suelo tomada en la empresa de fabricación y comercialización de PVC

Fuente: Autores 2019

Luego de observar los cambios macroscópicos que presentaban las colonias de las morfoespecies aisladas, se escogieron los ocho aislamientos que mostraban más diferencias físicas y tenían mejor crecimiento para realizar pruebas preliminares.

### 2.1.3 Especies escogidas para pruebas preliminares

De acuerdo con la tabla 2, se escogieron las siguientes especies, las cuales se probaron en las pruebas preliminares es por esto que se realizó una caracterización morfológica con la identificación del género al que pertenecen usando las claves de Domsch y Gams [35, 36].

Código de identificación	Cepa identificada	Descripción microscópica
D3	<i>Glicocladium</i>	Conidióforos hialinos, con ramas de penicilato, que forma un cepillo compacto, hialinos brillante en masa.
L	<i>Streptomyces</i>	Esporas diminutas producidas en cadenas por hifas de segmentación.
W	<i>Piptoceph</i>	Conidióforos poco ramificados
M	<i>Tetrachaetum</i>	Conidióforos simples escasamente ramificados, delgados; conidias apicales, hialinas de varias denominaciones, que consisten en ramas largas que divergen de un punto común, con una rama de la espora.
E10	<i>Sympodiella</i>	Se observan cadenas largas. Conidióforos solitarios simples,

		oscuros, hialinas en cadenas no ramificadas unidas, lateralmente cilíndricas con extremos romos.
F	<i>Synnematium</i>	Principalmente en los extremos de las ramas, delgadas afiladas hasta una punta puntiaguda, conidios hialinos.
AB	<i>Penicillium</i>	Conidióforos que surgen del micelio individualmente ramificado cerca al ápice, conidias hialinas o de colores brillantes en masa, la mayoría globosas u ovoides.
Q	<i>Mucor</i>	Conidióforos agrupados en forma de globo.

Tabla 2. Especies fúngicas para pruebas preliminares

## 2.2 PRUEBAS PRELIMINARES

### 2.2.1 Tratamiento térmico

Para estas pruebas preliminares se realizó un tratamiento térmico en el cual se sometió la lámina de PVC a 150 °C durante una hora, en la ilustración 4, se muestra

la diferencia entre la masa ganada por el hongo con las películas que estuvieron sometidas al calor (C) y la masa del hongo con las películas que no fueron expuestas al calor (SC). En el diagrama se reportaron medianas de 0,0066 para la prueba con calor y de 0,0062 para la prueba sin calor, también se observan los datos atípicos existentes para la masa sin tratamiento térmico

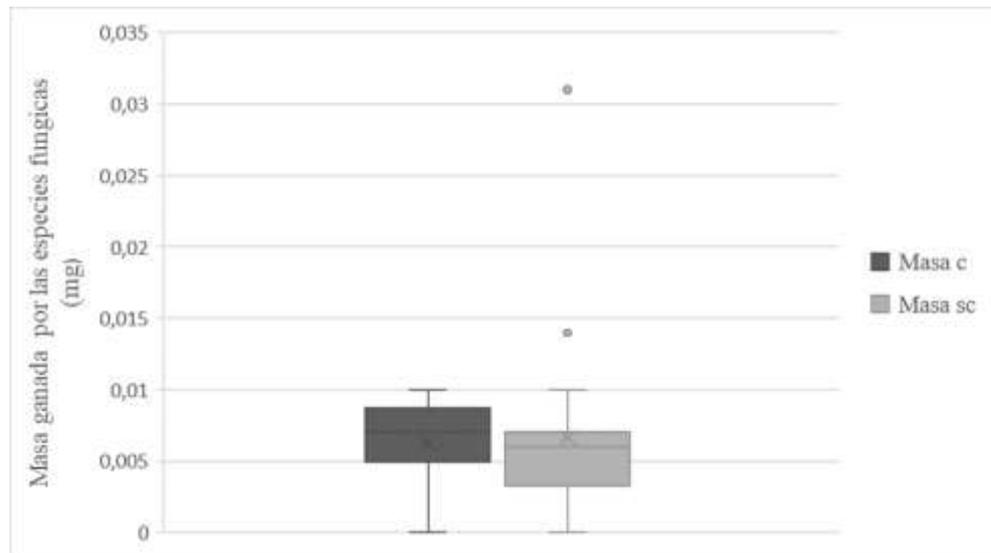


Ilustración 4. Box plot para los datos obtenidos de masa ganada por el hongo para ensayos de películas tratadas con calor (masa c) y sin calor (masa sc)

Fuente: Autores 2020

### 2.2.2 Masa ganada por el hongo

La ilustración 5, muestra los resultados de las pruebas que se realizaron para determinar cuál de las ocho especies escogidas tenían mejor crecimiento luego de seis semanas de interacción con películas de PVC. La barra negra muestra la masa ganada por el hongo, en la que los aislamientos AB y Q muestran los mejores resultados obteniendo valores mayores a 0,008 g.

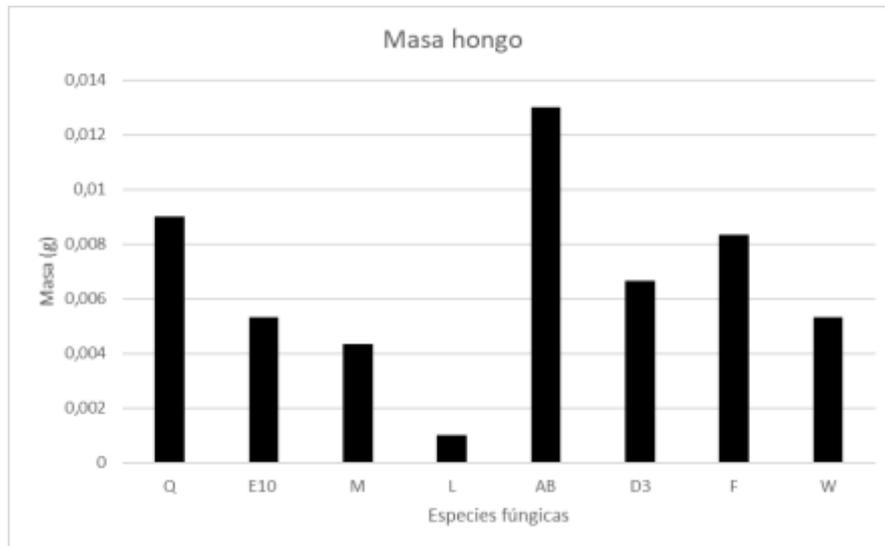


Ilustración 5. Masa ganada por el hongo en segundas pruebas preliminares

Fuente: Autores 2020

### 2.2.3 Masa pérdida por la película de PVC

La ilustración 6, se evidencia las especies fúngicas en las cuales se reportó una pérdida importante de masa en las láminas de PVC, las especies Q y AB mostraron valores mayores a 0,0010 g, indicando que durante las seis semanas que tardo la prueba preliminar se liberó masa de las películas de PVC.

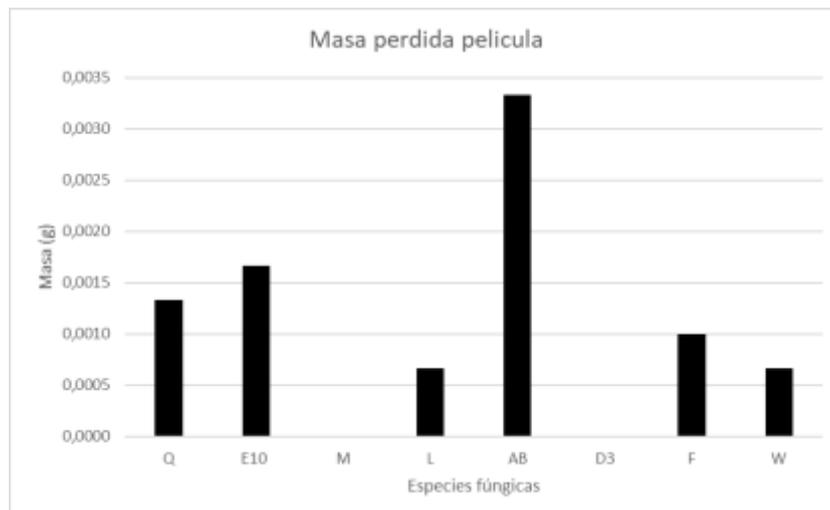


Ilustración 6. Masa pérdida de película de PVC en segundas pruebas preliminares

Fuente: Autores 2020

## 2.2.4 Masa de cloruro en el sobrenadante

En la ilustración 7 se evidencia la masa de cloruro (que se determinó a partir de la diferencia entre el blanco patrón y la masa de cloruro para cada aislamiento) en el sobrenadante, muestra que el mayor incremento fue en los sobrenadantes de los aislamientos AB y Q con cifras superiores a 0,015 g de Cl<sup>-</sup>

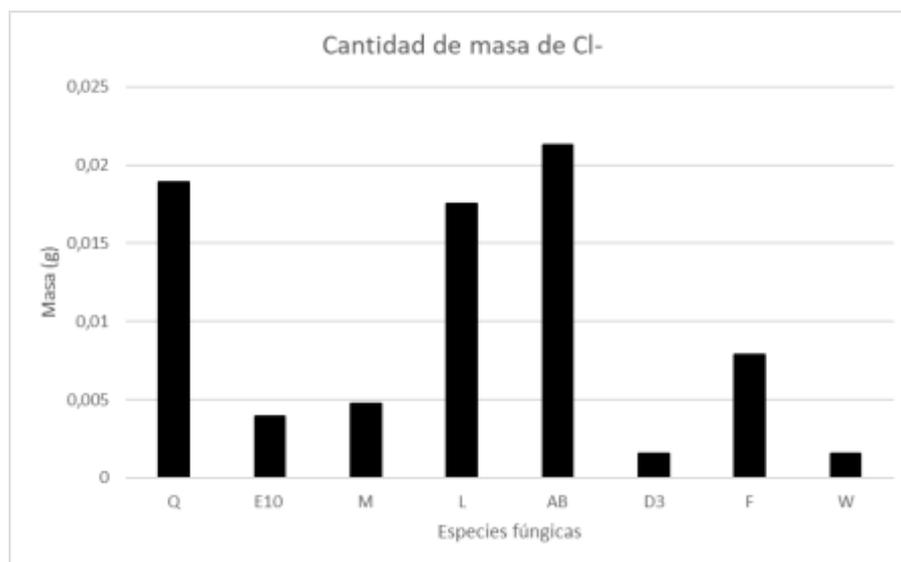


Ilustración 7. Masa de cloruro en el sobrenadante en segundas pruebas preliminares

Fuente: Autores 2020

## 2.2.5 Espectro Infrarrojo

Se tomaron espectros mediante FTIR de todas las películas que estuvieron expuestas a la acción de las cepas fúngicas nombradas en la tabla 1, sin embargo, como se describen en la ilustración 5, las cepas que mostraron mejores resultados fueron Q y AB es por esto por lo que se muestran los espectros de estas dos especies únicamente.

La ilustración 8, muestra los espectros obtenidos para la película de PVC antes (línea continua) y después (línea punteada para AB y Q) de la prueba, el espectro de la película de PVC antes de la prueba muestra bandas fuertes en la longitud de onda de 2900 cm<sup>-1</sup> que corresponden al estiramiento de los enlaces C-H. De la misma manera

se encuentran bandas agudas en las longitudes de onda de 834 y 847  $\text{cm}^{-1}$  correspondientes al enlace C-Cl [29]. También se muestra un estiramiento asimétrico del enlace  $-\text{CH}_2$  ubicado en la longitud de onda de 2400  $\text{cm}^{-1}$  [37]. En el espectro de la película después de la prueba con el aislamiento Q y AB, se observa que el espectro se desplaza hacia abajo reduciendo la extensión de sus bandas correspondiente a la longitud de onda entre 2900 y 2800  $\text{cm}^{-1}$  del enlace C-H, de igual forma se presenta un importante cambio en el estiramiento asimétrico en el enlace  $-\text{CH}_2$ .

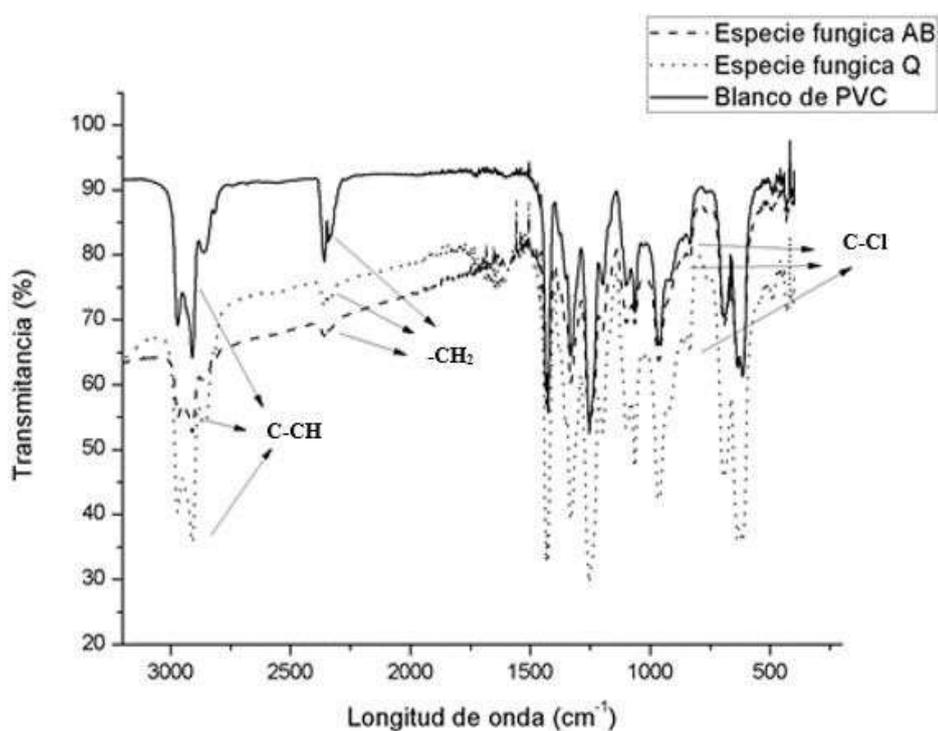


Ilustración 8. Espectro IR especies AB y Q en segundas pruebas preliminares, en comparación con el espectro de una película de PVC sin tratamiento (Blanco PVC)

Autores: Fuente 2020

## 2.3 CURVAS DE CRECIMIENTO

### 2.3.1 Curva de crecimiento

En la ilustración 9, se muestra los resultados obtenidos en las curvas de crecimiento de las dos morfoespecies seleccionadas (*Mucor* sp., y *Penicillium* sp.). En la ilustración 14, se evidencia en color negro el crecimiento de la cepa *Mucor* sp., en la cual se observan que se dieron picos de crecimiento mayores a 0,005 g en la semana 1, 9, 12, 13, 14 y 15. Durante diferentes periodos de semanas se muestra que la masa ganada disminuyo con relación a las demás.

Para el caso de la otra cepa *Penicillium* sp., se dieron crecimientos mayores a 0,005 en la semana 4, 9, 13,14 y 15, pero al igual que la otra presento casos donde se redujo la cantidad de masa. De acuerdo con las dos curvas de crecimiento se infiere que las dos se mantuvieron con vida durante las quince semanas de estudio.

La relación que se da con la masa de para cada especie fúngica en la cual se adquiere o se pierde en cada semana, está dada por la interacción las cepas con el medio y como estas son capaces de probar diferentes baterías enzimáticas que le sirvan para lograr degradar el PVC y de esta forma lograr aprovechar los componentes de los cual está hecha la lámina de PVC, ya que si logra deshacer algunos enlaces químicos, en el sobrenadante quedaran nutrientes para su aumento de masa, por otra parte se presentan picos y reducciones durante el análisis ya que la adaptación de cada cepa se da de maneras diferentes y por varios mecanismos que le permitan sobrepasar diferentes etapas.

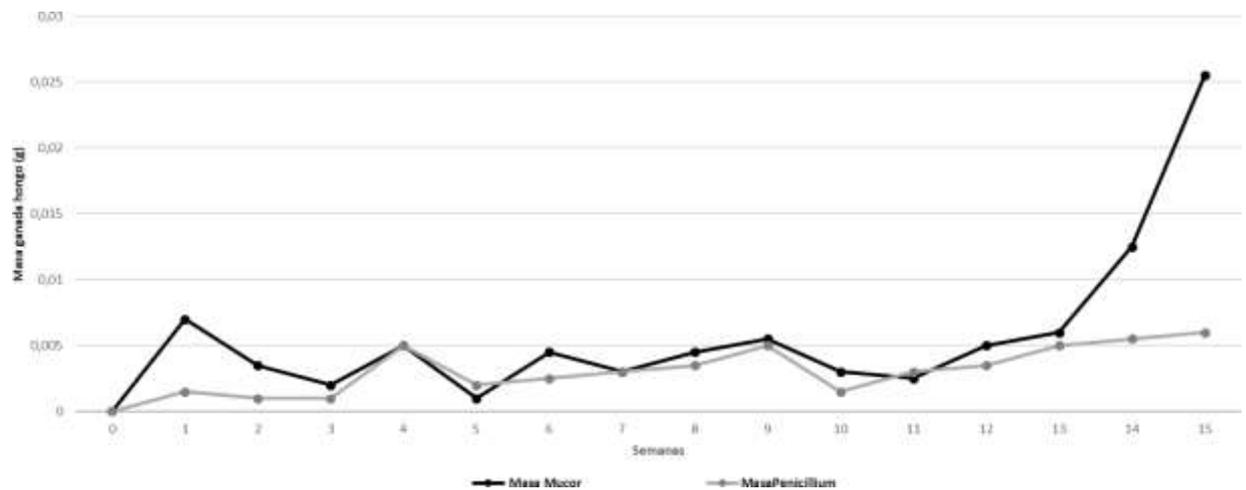


Ilustración 9. Curva de crecimiento especie *Mucor sp.*, y *Penicillium expansum*

Fuente: Autores 2020

### 2.3.2 Curva de crecimiento vs esporas en el medio

En la ilustración 10, se presentan las curvas de crecimiento para cada una de las especies y su relación con la cantidad de esporas que hay en cada semana. En color negro se observa la curva y en barra de rombos opacos las esporas para *Mucor sp.*, Los valores más altos se dieron: para la semana 6 la masa era de 0,005 g y la cantidad de esporas superaba los 400000, en la 9 la masa reportada era de 0,005 g y las esporas mayores a 250000, para la semana 12 la masa era de 0,005 g y las esporas eran mayores a 300000, para las siguientes semanas 13, 14 y 15 la masa aumento significativamente y las esporas fueron mayores a 200000.

Para la cepa *Penicillium sp.*, se muestra en color gris la masa ganada durante el estudio y en barras con cuadrículas, se observa que hubo un pico de esporas superior a 300000 para la semana 9 con una masa cercana a 0,005 g, para la semana 12 se reportaron más de 200000 esporas, pero la masa aproximadamente era de 0,004 g, para la semana 13 aumento la masa y las esporas se mantuvieron igual, para la semana 14 y 15 disminuyo la cantidad de esporas, aunque la masa aumentó un poco.

Para el caso de la cantidad de esporas presentes en el medio con relación a la masa ganada, se genera cuando las morfoespecies atraviesan por etapas de reproducción en donde la cantidad de esporas aumenta con el fin de mantener la especie con vida, mientras que la fase vegetativa de la cepa se logra estabilizar usando los nutrientes que encuentra disponibles. Durante las 15 semanas de estudio, las dos cepas atraviesan diversas fases de crecimiento, sin embargo, en las fases de muerte donde se reduce la masa, las esporas se aumentan para sostener la especie, pero al finalizar el estudio las dos fases (vegetativa y reproductiva) logran mantenerse similares una con la otra.

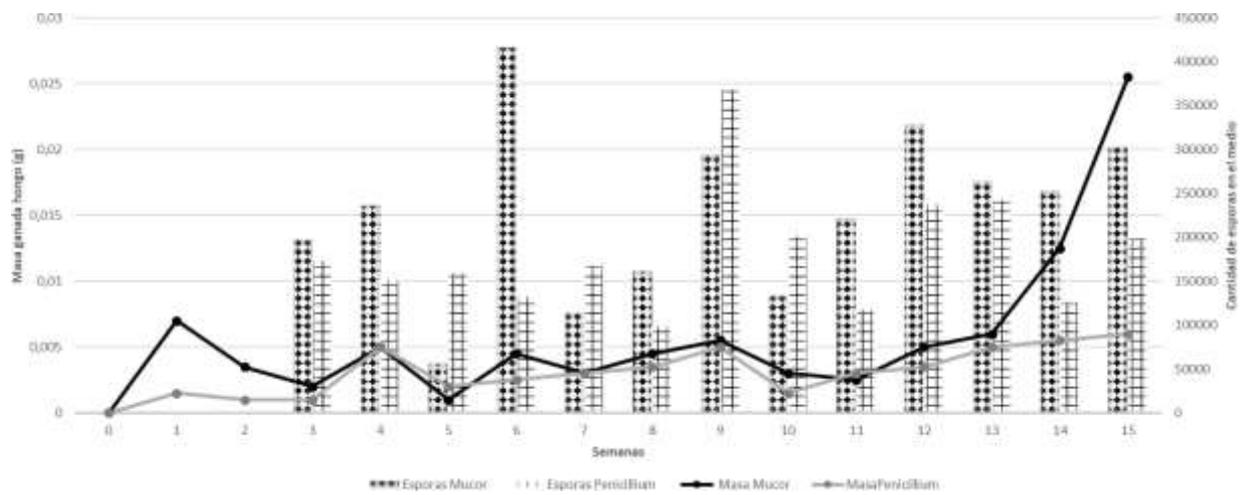


Ilustración 10. Curva de crecimiento vs esporas en el medio de las dos especies seleccionadas

Fuentes: Autores 2020

### 2.3.3 Curva de crecimiento vs masa de cloruro en el sobrenadante

En la ilustración 11, se observa la relación entre la curva de crecimiento y la masa de cloruro presente en la sobrenadante. El valor mostrado se determinó a partir de la diferencia entre el blanco y la masa de cloro de cada semana para cada especie. En barras de rombos grandes se muestra la cantidad de masa existente para cada semana de análisis de la cepa *Mucor* sp., se demuestra que la cantidad de cloruro presenta picos superiores a 0,06 g de cloruro en las semanas 1, 7, 12, 14 y 15 y la masa del hongo sufría variaciones entre 0 y 0,025 g para las semanas mencionadas anteriormente.

Para el resto del estudio se dieron variaciones en la cantidad de cloruro oscilando entre 0,2 y 0,8 g. Para la cepa *Penicillium* sp., en barras de color negro se señala la masa de cloruro. Para las semanas 0,7, 14 y 15 se observó que el valor reportado fue mayor a 0,06 g, sin embargo, la masa reportaba valores entre 0 y 0,005 g.

La cantidad de masa presente en el medio con relación a la curva de crecimiento resultan no tener una relación directa, ya que al inicio del estudio se reportan altas cantidades de esta, esto probablemente se da porque en el medio se encontraban disponibles algunos nutrientes que se lograron mantener luego del montaje de la siembra. Por otra parte durante el estudio se observa que en algunos casos, como por ejemplo, en la semana 5, para las dos cepas, la cantidad de cloruro era mayor a 0,4 g y la cantidad de masa era inferior a 0,005, este hallazgo se puede relacionar con que la descomposición química del hongo favorece la liberación de radicales libres de cloro que se depositan en el medio, pero no logran ser una fuente

significativa de nutrientes como el carbono que son los necesarios para que las especies aumenten su masa.

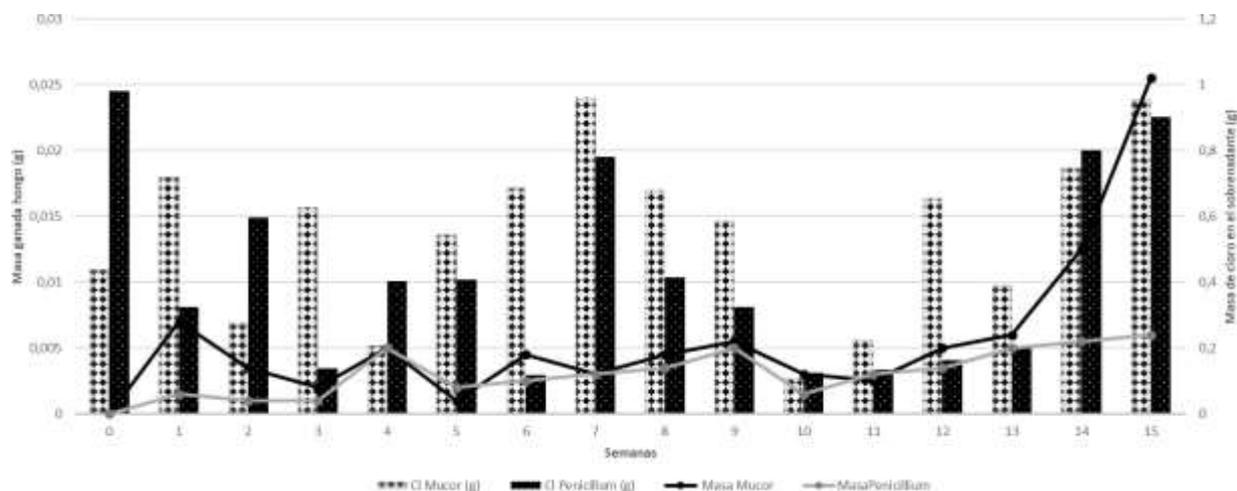


Ilustración 11. Curva de crecimiento vs masa de cloruro presente en el sobrenadante de las dos especies seleccionadas.

Fuente: Autores 2020

### 2.3.4 Curva de crecimiento vs masa pérdida de la película

En la ilustración 12, se señala la pérdida de masa de la película de PVC durante el estudio, para *Mucor* sp., se dio una reducción significativa para las semanas 1, 12 y 14 con un valor mayor a 0,004 g, mientras que para *Penicillium* sp., en las semanas 2, 3 y 14 mostraron valores mayores a 0,004 g. Este parámetro sirve como un posible indicio para saber si se está dando una degradación, ya que, si la lámina de PVC que se encuentra con interacción con el hongo reduce su masa, es probable que esto se dé gracias a la acción degradadora de cada especie fúngica.

Para el caso de la masa perdida de la película de PVC, esta no es una variable dependiente de la masa ganada por el hongo, si bien sirve como herramienta para verificar la degradación, esto probablemente se da porque la acción fúngica durante

este tiempo de análisis está logrando romper enlaces de los cuales se componen las películas y por tal motivo se pierde masa de las láminas, pero aún no sirven como fuente de nutrientes para las cepas, para que esto suceda los hongos deben romper más los enlaces hasta llegar a la liberación de compuestos de carbono, mientras esto sucede, los hongos deben alimentarse de lo que encuentran fácilmente disponible.

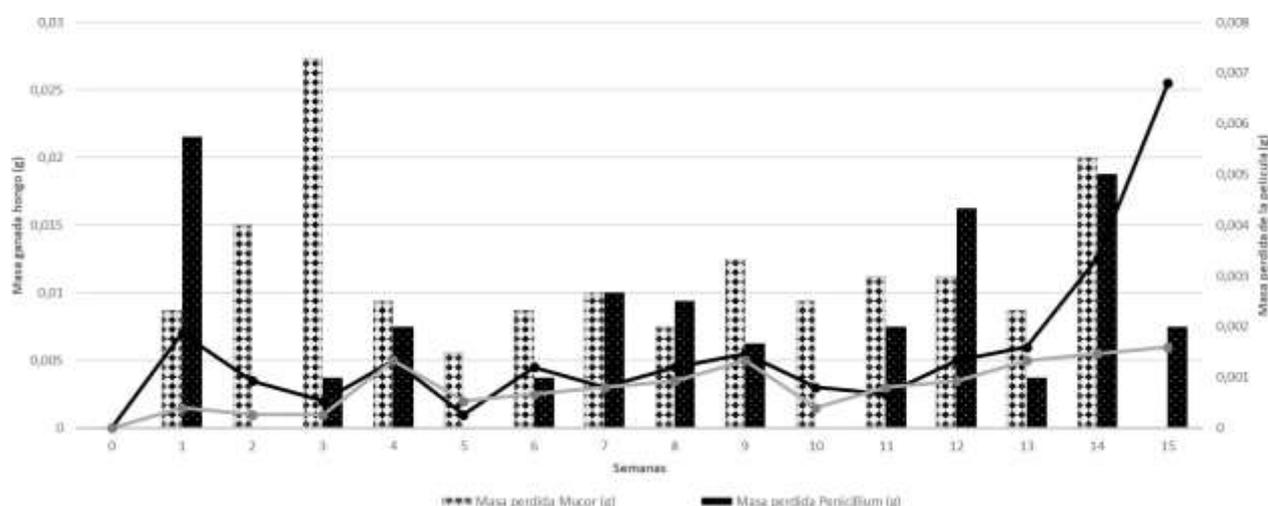


Ilustración 12. Curvas de crecimiento vs masa pérdida de la película de PVC para las dos especies seleccionadas.

Fuente: Autores 2020

### 2.3.5 Espectro infrarrojo

En la ilustración 13, se observa el espectro infrarrojo de películas de PVC correspondientes a la semana 15 de estudio luego de haber sido sometidas a la acción de la especie *Mucor* sp., y *Penicillium* sp., en los cuales se evidencia una reducción en el pico de  $2900\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al enlace C-CH, igual que en el estiramiento asimétrico del enlace  $-\text{CH}_2$  para la especie *Penicillium* sp. Sin embargo, estos picos desaparecen completamente para la especie *Mucor* sp., comparado con el blanco.

Por otra parte, en las bandas de longitudes de onda entre  $834$  y  $847\text{ cm}^{-1}$  que se relaciona con el enlace C-Cl se observa una disminución en la intensidad del

estiramiento, de lo que se puede deducir que se presentan reacciones de eliminación y sustitución [38].

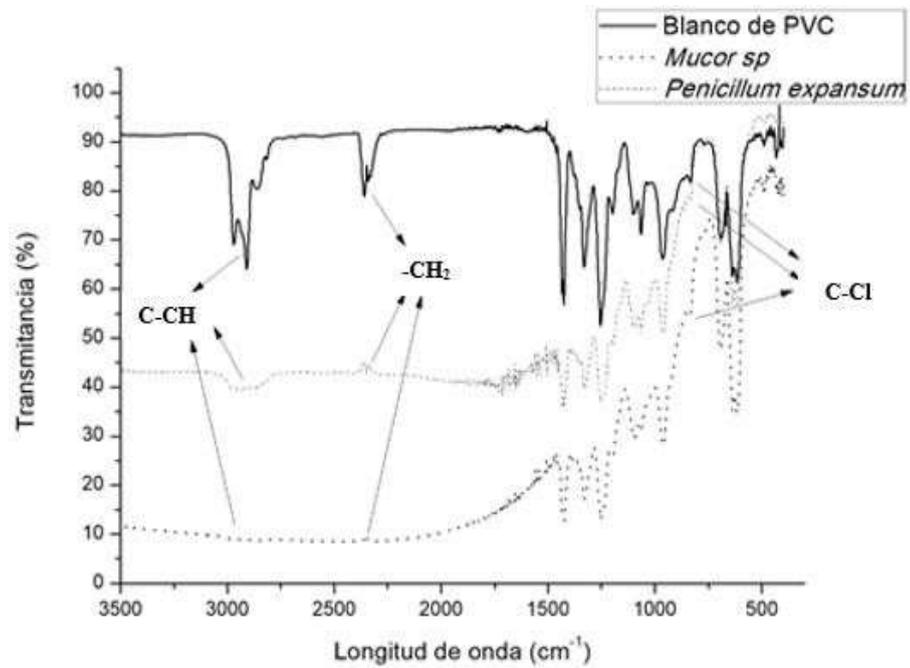


Ilustración 13. Espectro IR de *Mucor sp* y *Penicillium expansum*

Fuente: Autores 2019

### 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### 3.1 PRUEBAS PRELIMINARES

Primero se llevaron a cabo unas pruebas preliminares hechas a partir de películas de PVC sin plastificante calibre 460 micras, los resultados obtenidos de estas pruebas no mostraban crecimiento para los hongos, ni cambios en las películas usadas. Debido a que estos malos resultados podían estar relacionados con el grosor de la película, se repitió la prueba preliminar cambiando las películas de PVC usadas por unas hechas en el laboratorio a partir de resina de PVC y tetrahidrofurano, las cuales se obtuvieron en un grosor mucho menor a las primeras. Además, se realizó un tratamiento térmico previo con el fin de lograr que la lámina sufriera un desgaste y de esta forma fuera más sencillo para las especies fúngicas degradarla.

Luego de realizado el tratamiento térmico previo, el cual se mostró mediante un diagrama box plot en la ilustración 4, se evidencia que no hubo una diferencia significativa entre la masa del hongo de las láminas de PVC que estuvieron sometidas al calor y la masa del hongo de las películas que no se expusieron al calor, esto se determinó teniendo en cuenta que las medianas entre las dos cajas eran muy similares, por lo tanto el tratamiento térmico previo no tuvo mayor implicación en la degradación de PVC.

La masa ganada por las especies fúngicas, para esta prueba se presenta en la ilustración 5, donde se evidencia que los aislamientos que reportaron mayor crecimiento fueron AB y Q con valores mayores a 0,008 g. En el caso de la masa perdida de la película expuesta en la ilustración 6, indica que las láminas de PVC que

reportaron una mayor reducción fueron las de las especies Q, E10 y AB con valores mayores a 0,0010 g, este indicador muestra que se resalta nuevamente la actividad generada por los aislamientos Q y AB.

La masa de cloruro presente en la sobrenadante muestra que la cantidad de cloruro más alta, fue la reportada por las especies Q y AB con valores mayores a 0,0015 g de cloruro, lo que podría indicar que en el medio de estas morfoespecies, se dio lugar a una reacción química que favoreció la liberación de cloruro al medio sobrenadante, esto resulta ser un buen indicio de degradación y otra vez los aislamientos Q y AB son los que reportan mejores resultados durante las cinco semanas de análisis.

Para corroborar dichos resultados se tomó un espectro infrarrojo de películas de PVC que estuvieron expuestas a las especies AB y Q ya que estos fueron los que mostraron datos más altos que las demás especies para todos los parámetros evaluados. Para las dos especies se observa un desplazamiento hacia abajo reduciendo la extensión de sus bandas correspondiente a la longitud de onda entre 2900 y 2800  $\text{cm}^{-1}$  del enlace C-H, por otra parte, también se presenta un cambio en el estiramiento asimétrico en el enlace  $-\text{CH}_2$ , lo que indica que dada la acción fúngica de estas especies se están posiblemente presentando cambios en la estructura química de la película de PVC en estudio.

De acuerdo con lo anterior se procedió a escoger estos dos aislamientos fúngicos (Q y AB) para realizar el montaje de las curvas de crecimiento y realizar un estudio para verificar su actividad degradadora.

### 3.2 CURVAS DE CRECIMIENTO

En la ilustración 9 se observa la curva de crecimiento para los aislamientos fúngicos *Mucor* sp., y *Penicillium* sp, con el fin de establecer cambios entre una semana y la otra se realizó la prueba t para dos varianzas iguales. Los cambios que se dieron durante la curva de crecimiento fueron: de la semana 0 – 1, se muestra un pequeño crecimiento, el aislamiento *Mucor* sp., paso por un periodo de latencia y logró aprovechar un poco de los nutrientes que se encontraban disponibles, sin embargo, en la semana 1-2 no se encontraron las mismas condiciones en el medio es por esto no hubo crecimiento y paso por un periodo de muerte; en la semana 2-4 consiguió estabilizarse entrando a una fase de adaptación a los pocos nutrientes que se encontraban, aunque en este periodo no se dieron cambios significativos. De igual forma se repite el comportamiento presentado en la semana 1-2 y 2-4, para la semana 4-5 donde no existe crecimiento y nuevamente atraviesa un periodo de muerte y 5-6 logró un escaso crecimiento alcanzando una fase estacionaria [39].

Para el periodo de la semana 6 a 9, no se lograron identificar diferencias, otra vez pasó a una fase de adaptación, en este lapso posiblemente se prepararon baterías enzimáticas para lograr la descomposición del PVC; la cepa una vez más llega a una etapa de muerte durante la semana 9 a 10, para la semana 11 a 12 probablemente inicia una fase de crecimiento logarítmico. Luego del análisis hecho de la primera a la decimosegunda semana, se observó que la especie atravesó por etapas de muerte y otras de adaptación, mostrando posibles alteraciones entre una semana y otra, de lo que se deduce que durante este periodo se dio una fase de adaptación. Finalmente, a partir de la semana 13 hasta la última semana de estudio continua la fase logarítmica [39].

Para el aislamiento *Penicillium* sp., se observó el comportamiento de la curva de crecimiento en línea continua color gris y para la cantidad de esporas en barras de cuadrícula. Como en el aislamiento anterior, se realizó prueba t para dos varianzas con el fin de verificar las diferencias, para esta cepa se evidencio: en la semana 0-1 creció un poco, tal vez porque ocurrió lo mismo que en la especie anterior algo de los nutrientes que estaban en el medio sirvieron para lograr ese crecimiento, luego de la semana 1 a 3 pasa por una fase de latencia en donde la masa se mantiene constante durante este tiempo, durante la semana 3 a 4 nuevamente se ve un crecimiento mínimo, pero en la semana 4 a 5 vuelve a disminuir, probablemente alcanzando una fase de muerte, de la semana 5 a 9 hay una fase estacionaria, donde la masa se mantiene similar entre una semana y la otra, para la semana 9 a 10 llega evidentemente a una fase de muerte, para la semana 10 a 11 posiblemente llega a una fase de adaptación y se mantiene así hasta finalizar el estudio, aunque esta cepa no logra alcanzar una fase logarítmica [39].

La cantidad de esporas vs la curva de crecimiento se presenta en la ilustración 15, para el aislamiento *Mucor* sp., la cantidad de esporas varía significativamente, se puede evidenciar que en las semanas 4, 6, 9, 12, 13 y 14 se dieron picos mayores a 250000 esporas en el medio. Al principio de la semana 4 se estaba presentando un fase de adaptación al medio mientras que se estaba dando un proceso significativo de esporulación de acuerdo con los datos reportados, esto tal vez ayudó a que el aislamiento lograra mantenerse con vida; por otra parte al comienzo de la semana 6 se muestra un mínimo aumento de masa demostrando que se encuentra iniciando una fase estacionaria, sin embargo la cantidad de esporas es la más alta durante el estudio, esto indicaría que la fase reproductiva es la que ha mantenido en desarrollo la especie, al comenzar la semana 9 se da el inicio de una fase de muerte

correspondiente a la etapa vegetativa pero la cantidad de esporas sigue siendo mayor a 250000, se puede deducir que mientras la cepa logra adaptarse a las condiciones del medio que tiene disponibles, hay reproducción sexual en las células del hongo. Mientras que en semanas donde se da crecimiento y posiblemente se está llegando a una fase exponencial como en la semana 11, las esporas tienden a bajar un poco, pero manteniendo la reproducción. Por último, para las semanas 12, 13 y 14 las esporas se mantienen en un rango de 250000 a 300000, esto posiblemente se da porque el crecimiento pudo seguir aumentando y la actividad celular se mantuvo constante para acompañar la etapa vegetativa.

Por lo que se refiere a la cantidad de esporas de la cepa *Penicillium* sp., en las semanas 9, 12 y 13 las esporas fueron mayores a 200000, una vez más la reproducción sexual se dio durante estas semanas, sirviendo de soporte mientras que la fase vegetativa se equilibraba, por ejemplo en la semana 9 a 10 se comenzó una fase de muerte mientras que las esporas tuvieron una cantidad superior a 300000, para la semana 12 y 13 se dio una fase de latencia y la fase reproductiva se activó con el fin de no dejar morir completamente la especie [39].

En la ilustración 11, donde se relaciona la masa de cloruro del sobrenadante con la masa ganada por el hongo en cada semana de estudio, se puede observar que no existe una relación directa entre cada una, tal como se dio con la cantidad de esporas. Sin embargo, existen diferencias entre el inicio del estudio y el final que fueron de 0,5151 g para la cepa *Mucor* sp., y 0,0782 g para *Penicillium* sp. Lo que indica que se estaban llevando modificaciones que favorecían la liberación de cloruro al medio.

La masa pérdida de la película es un parámetro que sirve para saber si la lámina está sufriendo algún desgaste que haga que se reduzca su masa, pero durante el estudio, este no reporta valores los cuales se puedan relacionar con la curva de crecimiento. No obstante, se midió durante las 15 semanas y se reportaron pérdidas para la mayoría de ellas para las dos especies.

El espectro infrarrojo resulta ser un buen indicador para comprobar los cambios de las películas, este se muestra en la ilustración 13 y de acuerdo a los resultados se evidencia la desaparición de un estiramiento asimétrico del enlace  $-CH_2$  con respecto al blanco inicial, esto indica que sí se llevó a cabo una modificación estructural de las láminas por parte de la acción fúngica, el enlace C-CH correspondiente al pico de  $2900\text{ cm}^{-1}$ , también presentó un cambio significativo.

De acuerdo con Castañeda, en un estudio sobre el crecimiento de cuatro especies fúngicas, durante la fase de adaptación, las células se ajustan a su nuevo ambiente, es por esto que su metabolismo aumenta, así como la producción de proteínas y enzimas, en esta etapa se puede observar un aumento del volumen de esporas en cada organismo, situación similar a la que se presenta en este estudio, para la especie *Mucor* sp., para el inicio de la semana 4 y 6 en la cual se presenta una fase de estacionaria y también de adaptación [40].

Los cambios en los espectros infrarrojos mostrados anteriormente están de acuerdo con los resultados mencionados en la introducción, del trabajo publicado en 1999 por Kirbas, Guner y Keskin, en el que encontraron acción degradadora en las especies fúngicas *Pleurotus*, *Poliporus versicolor* y *Phanerochaete chrysosporium*, en donde se reportaron cambios en el enlace CH con una disminución del 82,15% medidos a

través de FTIR [8]. Además, en el año 2000 Webb realizó el estudio de colonización por hongos y biodeterioro de PVC, dentro de las cepas usadas se encontraba la especie fúngica *Penicillium glabrum* en la cual se demostró que los hongos producen esterases extracelulares que degradan plastificantes y causan la degradación de PVC, de acuerdo con esto, el aislamiento *Penicillium* sp., usado para este estudio resulta pertenecer al mismo género que al del estudio realizado en 2000 [41].

El aumento de masa de las morfoespecies probadas en el presente estudio se tomó como referencia a Ji-Dong Gu, que, en 2002, encontró que los polímeros como el PVC poseen sustratos potenciales para los hongos, ya que estos organismos disponen de enzimas como las extracelulares y depolimerasas intracelulares que participan en la degradación biológica. Es por esto por lo que el aumento en el peso de las especies se relaciona con la acción de exoenzimas que descomponen polímeros ya que producen cadenas cortas que son capaces de pasar el exterior semipermeable y luego ser utilizado como fuentes carbono y de energía, a este proceso se le conoce como despolimerización, de acuerdo con esto se evidencia que el incremento de masa de las dos especies estudiadas tiene como consecuencia la degradación de las películas de PVC [42].

De acuerdo con los resultados encontrados acerca de la cantidad de masa de cloruro en el sobrenadante, esto se puede relacionar con un proceso conocido como deshidrocloración del PVC, el cual consiste en una reacción donde los enlaces por los cuales está formada la cadena se rompen por la interacción con los microorganismos que ocasiona la degradación del polímero [43]. Sin embargo, teniendo como base los resultados obtenidos con relación a la disminución del estiramiento del enlace C-Cl de este estudio, en 2006 Halina Kaczmarek y Krzysztof

Bajer probaron la degradación de PVC usando especies fúngicas como *Trichoderma koningi*, *Fusarium oxysporu* y *Penicillium sp.*, encontrando cambios relevantes en el espectro infrarrojo en el rango del grupo C-Cl [43], de acuerdo con esto, se puede inferir que en los dos estudios se encontró una deshidrocloración dada por la acción de los hongos estudiados.

En 2011 Grisa A, Cardoso V y Zeni M realizaron estudios sobre la degradación biológica de PVC en un relleno sanitario, una de las cepas que mostró los mejores resultados fue la especie *Mucor spp.*, que es perteneciente al mismo género, de uno de los aislamientos usados en el presente estudio y de los que mostraron mejores resultados. De igual forma, Grisa encontró cambios importantes en la región del enlace C-H del espectro infrarrojo como se encontró en el análisis mostrado anteriormente [34].

Con respecto al análisis de infrarrojo realizado para verificar los cambios en la película de PVC, en 2012 Muhammad Ishtiaq Ali, Safia Ahmed y Geoff Robson probaron la degradación de láminas de PVC con aislamientos de las especies fúngicas: *Phanerochaete chrysosporium*, *Lentinus tigrinus*, *Aspergillus niger* y *Aspergillus sydowii*, en donde se encontraron cambios en la región 2370-2350  $\text{cm}^{-1}$  que corresponde al enlace HC-Cl, mientras que en los resultados obtenidos se encontró una reducción en la región de 834 y 847  $\text{cm}^{-1}$ , que se relaciona en los dos casos con la modificación estructural de las películas de PVC generada por la degradación biológica de las especies utilizadas en los dos estudios [9]. Igualmente, en India se probó la biodegradación de PVC mediante cepas microbianas, las láminas de PVC fueron enterradas en el suelo bajo condiciones de laboratorio, en este estudio se registró un cambio en las regiones de 2900 y 2980  $\text{cm}^{-1}$ , que son similares a las

encontradas en los espectros que se muestran en este documento. Sin embargo, en este caso el PVC contenía plastificante dentro de su composición es por esto que también se analiza la aparición de otros grupos como ésteres y ácidos carboxílicos que son atribuidos a la degradación de aditivos o plastificante [34].

### 3.3 REVISIÓN DEL CICLO DE VIDA DE PVC

Desde el enfoque de la gestión ambiental, entendido como una de las principales funciones que cumplen los ingenieros ambientales, es la adecuada disposición final de los residuos, de acuerdo con esto, se presenta una revisión de la degradación de PVC por diferentes métodos convencionales comparándolo con el proceso de biodegradación. En la ilustración 14, se muestra el ciclo de vida del PVC [44].

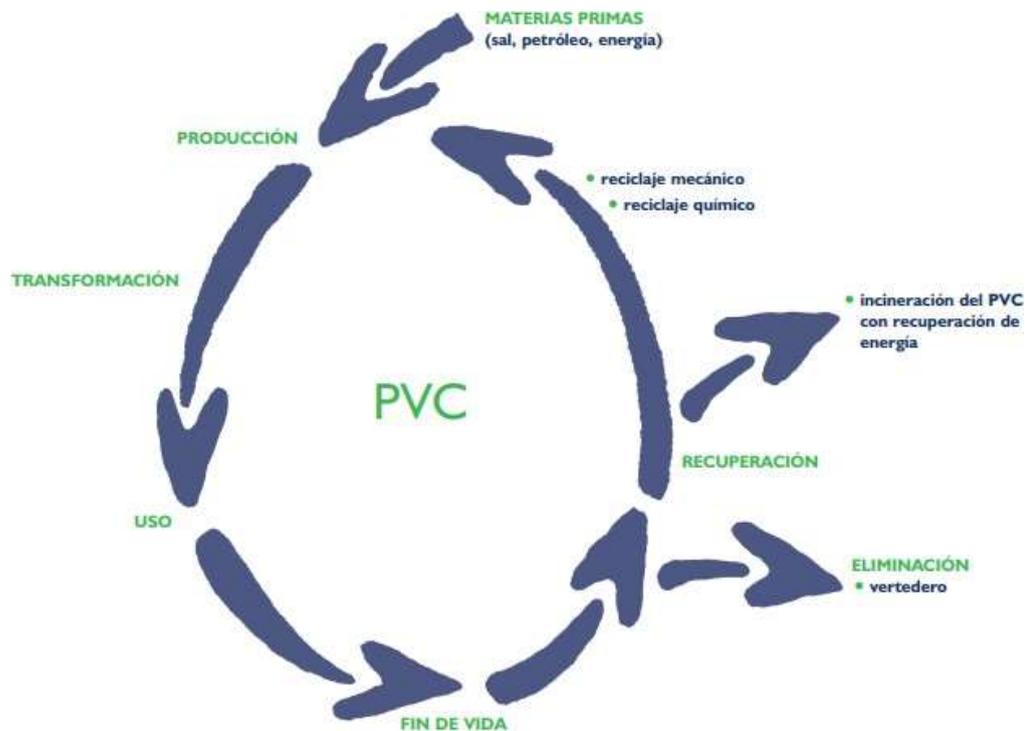


Ilustración 14. Ciclo de vida de PVC

Fuente: Sustainable Solution 2017

### 3.3.1 Producción

La producción de la resina de PVC (materia prima inicial para darle forma a la tubería de PVC), necesita de un monómero de cloruro de vinilo (VCM, por sus siglas en inglés), el cual es producido por medio de cloro y etileno. El cloro se hace a partir de sal por medio de la electrólisis de una célula de membrana/diafragma [44].

Dentro de la fabricación de este plástico, es importante la necesidad del uso de aditivos como estabilizantes, plastificantes que ayudan al material a la descomposición por el calor y diferentes tensiones durante su uso. En la sección 1.6.1 se hace una explicación minuciosa acerca del uso y la composición de estos compuestos adicionales que se agregan al PVC.

Por otra parte, para la producción de este material es necesario la sal común, que es de fácil acceso, esto significa que el PVC necesita menor cantidad de petróleo para su fabricación comparado con otros polímeros, lo anterior ocasiona que su fabricación se de en altas cantidades y no tenga control efectivo de producción [44].

### 3.3.2 Transformación

Luego del proceso de fabricación del monómero de PVC, se debe hacer un proceso de transformación o moldeado, se puede dar por diferentes métodos: calandrado, extrusión, inyección, compresión, recubrimiento, inmersión, entre otros que se explican a detalle en el apartado 1.6.1, en donde se explica cada uno de estos procesos con su resultado final y posterior aplicación [45].

### 3.3.3 Uso

De acuerdo con cifras del DANE, para 2017 la industria del plástico ha sufrido un crecimiento anual del 7%, lo que indica que las empresas dedicadas a la fabricación

de productos como el PVC ha aumentado su producción y con esto la cantidad de residuos que resultan luego del uso de este material [44].

Para el año 2018 la producción mundial de PVC superaba las 36.5 millones de toneladas por año, cerca del 70% de esta producción se destinaba a las aplicaciones de larga vida útil como el caso de las tuberías de PVC. Sudamérica tiene un 6% dentro de la demanda mundial de PVC, para el caso de Colombia se acerca aproximadamente a 180 mil toneladas al año [45].

Lo anterior quiere decir entonces que el mayor uso de PVC en Colombia se da en tuberías con un 56%, compuestos 16%, película flexible 7%, película rígida 6%, telas 6%, tejas 3%, otros 3%, perfiles 2% y cables 1%. La función principal de las tuberías de PVC es llevar agua potable, pluvial o residual a lo largo de una trayectoria definida, esta es de vital importancia el funcionamiento de las ciudades [45].

De acuerdo con un artículo publicado por el periódico Portafolio en septiembre de 2019, hoy en día el 40% de todos los dispositivos médicos en el mundo son hechos a base de plásticos y en especial del PVC, esto quiere decir que se ha masificado las utilidades que se la ha dado a este material, por otra parte también se emplea en la fabricación de calzado, muebles, partes de vehículos, telas tipo cuervo, pisos, plástico en ventanas, puertas, barandas y mobiliario público [46].

#### 3.3.4 Fin de vida

Una revisión realizada por Sustainable Solutions Corporation comprueba que la vida útil esperada de una tubería hecha de PVC es de 50 años, pero este dato depende de la cantidad de energía incorporada durante el traslado del agua, así como incluyen

otros valores como las propiedades químicas del agua. Teniendo en cuenta esto podría variar entre 15 y 100 años [44].

El PVC tiene una vida útil de más de 100 años para los usos en aguas, según estudios realizados por el Dr. S. Folkman, concluyó que se ven favorecidas por lo que no se encuentran a la intemperie y por eso no se ven afectadas por la corrosión; no obstante, en Europa realizaron excavaciones que confirmaron que después de 70 años de uso de las tuberías de PVC podrían llegar a tener un periodo de duración mayor acercándose a los 170 años [44].

Otro estudio realizado por Tennakoon realizó una exhumación de unas tuberías de alcantarillado de PVC, con esto logra darse una expectativa del tiempo adicional que posiblemente tendrían dichos tubos, logra llegar a la conclusión de que podrían tener un mínimo de 100 años y un máximo de 300 años de vida útil [44].

De acuerdo con lo anterior el tiempo en el que se llega al fin de la utilidad de las tuberías de PVC, no está preciso aun, pero diferentes estudios llegan a la conclusión de que el periodo de tiempo está cercano a los 100 años, esto resulta ser de gran beneficio para los compradores ya que no deben invertir constantemente, pero para el medio ambiente resulta ser un problema porque su descomposición es bastante larga [44].

### 3.3.5 Eliminación

- Relleno sanitario: es una de las soluciones comunes que se dan a los residuos de PVC, una eliminación del material en los botaderos de las ciudades, de esta forma se logra reducir la cantidad generada y este se entierra en el suelo,

causando desequilibrio a las propiedades de este, así como reducir la ocupación de dichos rellenos [45].

### 3.3.6 Recuperación

- **Reciclaje mecánico:** se basa en la transformación de residuos de fabricación de plástico con el fin de obtener propiedades físicas y químicas idénticas a la del material original, para este caso se deben realizar los siguientes pasos: separación, granulado, limpieza y peletizado.

De esta forma se logra obtener productos a base de materiales reciclados para la sustitución de tubos en instalaciones eléctricas, elaboración de estibas y mangueras de riego.

- **Reciclaje químico:** se busca obtener productos como monómeros, gases o corrientes hidrocarbonadas, para este se deben dar procesos depolimerización, gasificación entre otros.
- **Incineración con recuperación de energía:** se basa en el calentamiento del plástico con el objetivo de usar la energía térmica liberada de este proceso, el resultado obtenido es ácido clorhídrico como resultado de la combustión, este resulta ser un daño ambiental ya que se pueden producir dioxinas entre otros compuestos [45].

### 3.3.7 Estudio de caso reciclaje químico

En la Universidad Industrial de Santander en 2004, se realizó un estudio de una vía de reciclaje de PVC, posconsumo, para esto se tomó como base 200 g de policloruro de vinilo flexible. Para su preparación se realizó una limpieza y lavado del material,

se cortó el PVC para obtener una partícula aproximadamente de 2 mm de espesor [47].

Inicialmente se realizó una disolución en ciclohexanona, al evaporarse la muestra se obtuvo una película delgada la cual fue analizada en el espectrofotómetro, en donde se observaron bandas de absorción para C-C en 2913, 74  $\text{cm}^{-1}$ , 1430 para el grupo metileno y 690 para vibraciones de C-Cl.

En seguida con otra muestra se llevaron a cabo varios experimentos en diferentes condiciones: drástica (lentejas de NaOH), suave (NaOH/EtOH, NaOH/EtOH – glicerina) y acida (ácido sulfúrico concentrado) en las cuales se evaluaron las relaciones polímero/ reactante que resultaba de cada análisis, el mejor resultado se obtuvo en condiciones acidas con 10 g / 50 ml expuesto a una temperatura de 100°C durante 30 horas.

Al iniciar y finalizar cada prueba se realizaron pruebas de solubilidad, identificación de cloruros, determinación de grupos hidroxilos y espectros infrarrojo como variables para identificar los cambios más importantes.

Al finalizar los estudios con diferentes compuestos químicos lograron identificar un 80% de recuperación del material libre, se comprobaron cambios en bandas de absorción y la aparición de nuevos enlaces identificados en la espectro infrarrojo, se obtuvo un material blanco, libre de cargas y aditivos, de aspecto lanoso con relación al PVC tipo flexible utilizado al inicio del estudio, este puede ser incorporado en cadenas de producción en las que se requiera PVC virgen, en formulaciones nuevas o como aditivo de plastisoles, entre otros.

### 3.3.8 Comparación con la biodegradación.

De acuerdo con el estudio mencionado anteriormente, se logró identificar que por medio del reciclaje químico con compuestos químicos como ciclohexanona e hidróxido de sodio se consiguió una reducción del 80% de la lámina de PVC que inicialmente pesaba 200 g. Este estudio tardó aproximadamente 30 horas de análisis y se lograron identificar cambios en la estructura química del material, de esta forma se puede deducir que se logró degradar el PVC por este método.

Para el presente estudio de degradación de PVC con hongos se logró obtener una masa ganada por *Mucor sp.*, cercana a 0,025 g al cabo de 15 semanas de análisis, al igual que en el anterior se evidenciaron cambios en los espectros infrarrojo, y en algunas ocasiones la aparición o eliminación de nuevas bandas de absorción.

Tomando como referencia el estudio realizado por la Universidad de Santander comparado con el que se presenta, se observan que los dos métodos resultan lograr resultados para dar una posible disposición final del PVC, sin embargo para el caso del reciclaje químico es necesario el uso de compuestos químicos que tienen un costo significativo dentro del mercado ya que son necesarias grandes cantidades de reactivo como el ensayo donde se disolvió 10 g de PVC en 50 ml de ácido sulfúrico, por otra parte el uso de dichos compuestos no resulta ser de fácil acceso para el público ya que debe tener una controlada distribución; para este estudio se realizó una verificación cuantitativa y que se evidenció que el hongo adquirió masa durante el estudio, lo que podría estar relacionado con la capacidad de la especie en degradar los componentes y usarlos como nutrientes para su crecimiento, a pesar de que la cepa fúngica no logró llegar completamente a la fase estacionaria, solamente alcanzó

una etapa exponencial, por este motivo no se identificó la mayor cantidad de masa que hubiese podido obtener.

Comparando los dos estudios, con el fin de realizar una proyección de degradación a gran escala, se obtendría una reducción de la lámina de PVC por medio de los métodos, sin embargo el reciclaje químico implicaría el uso grandes cantidades de compuestos y por lo tanto sería de mayor costo, es por este motivo que en la actualidad no resulta ser una opción atractiva para las industrias de fabricación de PVC, no obstante la biodegradación resulta ser de bajo costo, ya que las especies son de fácil acceso y no necesita de gran cantidad de condiciones para su crecimiento, por otra parte para el inicio del proceso de la degradación con especies fúngicas no es necesario contar con una masa específica de inicio ya que durante el tiempo de degradación esta va atravesando la fase vegetativa a medida que va aprovechando los nutrientes.

### 3.3.9 Evaluación de impactos ambientales

Se realizó una identificación de impactos ambientales en cada uno de los procesos por los cuales pasa el PVC, estos son:

- Producción: en esta etapa se usa cloro, etileno y sal común para la elaboración del monómero de cloruro de vinilo, los impactos más importantes se generan en la reducción de los recursos naturales.
- Transformación: en esta fase se adiciona al PVC, elementos como compuestos aditivos, lubricantes, plastificantes entre otros que desde su elaboración generan impactos a cuerpos de agua, emisión de compuestos tóxicos, exposición a olores y vertimientos; por otra parte, se utiliza maquinaria la cual usa energía eléctrica.
- Uso: en esta etapa interviene empaques para el producto, en el cual se necesita publicidad para la venta y también vehículos que ayuden a la distribución del PVC, de esta forma los impactos más importantes serían el gasto de energía eléctrica, emisión de material particulado y uso de papel (reducción de bosque).
- Reciclado: este se da cuando se acaba el uso del material, de esta forma los elementos que se usan serían maquinaria para triturar el PVC, agua para lavar el material, hornos si se llegara a dar una incineración, entre otras alternativas que se tienen disponibles. Los principales impactos serían la emisión de compuestos, la contaminación del recurso hídrico, el uso de energía eléctrica y contaminación de suelos.

- Disposición final: esta etapa se pueden dar todas las alternativas mencionadas anteriormente (biodegradación, reciclaje químico, reciclaje mecánico) es por esto que para esto se usan especies fúngicas, rellenos sanitarios y compuestos químicos en donde se dan impactos más importantes serían la contaminación del recurso hídrico, del suelo y la reducción de la ocupación de los rellenos sanitarios.

### 3.3.10 Identificación de impactos ambientales en la biodegradación vs reciclaje químico

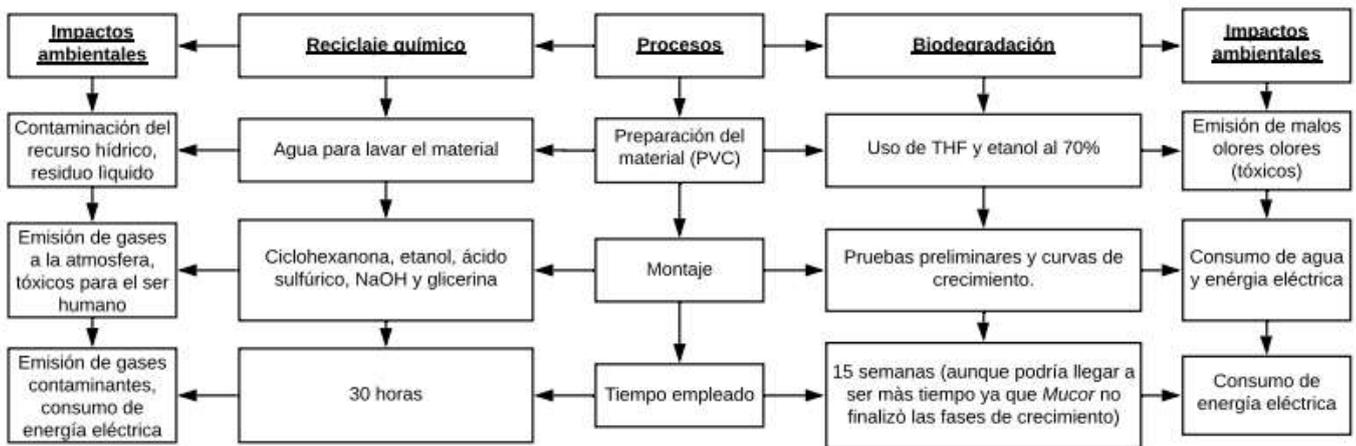


Ilustración 15. Identificación de impactos ambientales en la biodegradación

### 3.3.11 Matriz de impactos ambientales en la biodegradación

CATEGORIA	FACTORES AMBIENTALES		ALTERACIÓN	CLASE	PRESENCIA	DURACIÓN	EVOLUCIÓN	MAGNITUD	CALIFICACIÓN AMBIENTAL		IMPORTANCIA AMBIENTAL
	COMPONENTE	ELEMENTO AMBIENTAL							NEGATIVA	POSITIVA	
A B I O T I C A	HIDROESFERICO	Calidad de agua	Alteración en la calidad del agua	N	0,7	0,3	0,4	0,6	1,806		Baja
		Uso del agua	Uso de volúmenes importantes de agua	N	0,7	0,3	0,4	0,6	1,806		Baja
	ATMOSFERICO	Olores	Aumento de olores nocivos	N	0,8	0,6	0,6	0,6	3,456		Media
		Calidad de aire	Aumento de gases que son perjudiciales para la salud de las personas	N	0,8	0,4	0,6	0,6	2,976		Baja
		Microclima	Aumento de gases contaminantes a la atmósfera	N	0,8	0,3	0,6	0,8	3,408		Media
	SERVICIOS PUBLICOS	Disposición de residuos sólidos	Aumento de residuos contaminantes en los rellenos sanitarios	N	0,8	0,8	0,4	0,8	3,712		Media
		Energía eléctrica	Incremento en el uso de energía eléctrica	N	0,6	0,3	0,8	0,6	2,556		Baja

Ilustración 16. Matriz de impactos ambientales en la biodegradación

### 3.3.12 Matriz de impactos ambientales en reciclaje químico

CATEGORIA	FACTORES AMBIENTALES		ALTERACIÓN	CLASE	PRESENCIA	DURACIÓN	EVOLUCIÓN	MAGNITUD	CALIFICACIÓN AMBIENTAL		IMPORTANCIA AMBIENTAL
	COMPONENTE	ELEMENTO AMBIENTAL							NEGATIVA	POSITIVA	
ABIOTICA	HIDROESFERICO	Calidad de agua	Alteración en la calidad del agua	N	0,6	0,4	0,4	0,6	1,728		Baja
		Uso del agua	Uso de volúmenes importantes de agua	N	0,6	0,4	0,4	0,6	1,728		Baja
	ATMOSFERICO	Olores	Aumento de olores nocivos	N	0,2	0,6	0,6	0,6	0,864		Baja
		Calidad de aire	Aumento de gases que son perjudiciales para la salud de las personas	N	0,2	0,4	0,6	0,6	0,744		Baja
		Microclima	Aumento de gases contaminantes a la atmósfera	N	0,2	0,4	0,6	0,8	0,912		Baja
	SERVICIOS PUBLICOS	Disposición de residuos sólidos	Aumento de residuos contaminantes en los rellenos sanitarios	N	0,6	0,8	0,4	0,8	2,784		Baja
		Enérgia eléctrica	Incremento en el uso de energía eléctrica	N	0,8	0,4	0,4	0,6	2,304		Baja

Ilustración 17. Matriz de impactos ambientales en el reciclaje químico

#### 4. CONCLUSIONES

A lo largo de este documento se demuestra que se logró estudiar la degradación del PVC con morfoespecies fúngicas aisladas de un suelo. Esto se logró a través de la determinación de variables como la masa ganada por el hongo, la masa pérdida de las películas de PVC, la masa de cloruro presente en el sobrenadante y la comparación de espectros infrarrojo para el caso de las pruebas preliminares; mientras que para las curvas de crecimiento se identificó a partir de la masa ganada por las dos especies seleccionadas cada 7 días, así como la cantidad de esporas presentes en el medio y la comparación de los espectros IR de las películas, obtenidos al inicio y final de la curva.

Se aislaron 23 morfoespecies de una muestra de suelo, de los cuales se clasificaron 8 aislamientos pertenecientes a los géneros: *Gliocladium*, *Streptomyces*, *Piptoceph*, *Tetrachaetum*, *Symptodiella*, *Synnematium*, *Penicillum* y *Mucor*, esta clasificación se realizó teniendo en cuenta las características macroscópicas y microscópicas.

Luego del estudio de las variables mencionadas en el párrafo anterior, se determinó que la especie que mostró mejores resultados fue *Mucor* sp., debido a que en pruebas preliminares obtuvo una masa superior a 0,008 g, una masa de cloruro mayor a 0,0015 g y mostró un cambio importante en el espectro infrarrojo correspondiente al enlace -CH<sub>2</sub>. En la curva de crecimiento logró demostrar crecimiento durante las 15 semanas, a pesar de las alteraciones que presentó durante las diferentes fases de crecimiento, al final de esta curva, mostró claramente un crecimiento exponencial. Además, se observó en el espectro infrarrojo la eliminación del enlace mencionado anteriormente.

Se comparó la disposición final del PVC por biodegradación con respecto a un estudio de reciclaje químico, el reciclaje mostró resultados de reducción del 80%, aparición de nuevos enlaces químicos y la reducción de otros, sin embargo este resulta ser de alto costo y durante el proceso se puede dar la liberación de contaminantes al medio ambiente, para el caso de la biodegradación se concluyó que se dio acción de las especies seleccionadas, y por tal motivo se dio una degradación en las películas de PVC, si bien los resultados encontrados no reportaron resultados alto de degradación, si se comprobó que la cepa *Mucor* lograba degradar, y este resulta ser de bajo costo y de fácil acceso.

Se realizó una identificación de impactos ambientales para cada una de las alternativas propuestas para la disposición final de PVC, de esta forma la matriz de impactos arrojó que habían 3 impactos con importancia ambiental media para el caso del reciclaje químico y para la biodegradación todos son de importancia ambiental baja.

## 5. RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos se recomienda tener un mayor tiempo la interacción de los hongos con las láminas de PVC, ya que de esta forma se tendría un estudio más detallado de la degradación de PVC, ya que es evidente en la figura 12, que el último dato registrado fue en la fase de crecimiento, y por lo tanto no se logró llegar a la fase estacionaria en la cual se lograra la mayor cantidad de masa y posiblemente en esta fase se evaluarían otras condiciones presentadas en la película de PVC.

Se propone variar las condiciones óptimas de crecimiento (pH, temperatura, agitación) o nutrientes del medio mínimo de sales, esto con el fin de lograr una adaptación al medio por parte de las especies fúngicas probadas y que estos tarden menos tiempo en llegar a la fase exponencial que es cuando logran llegar a su mayor cantidad de masa.

Se recomienda probar la especie *Mucor* para la degradación de PVC, en muestras de residuos domésticos con el fin de analizar el comportamiento, ya que este aislamiento mostró mejores resultados.

En caso de pensar en esta alternativa de disposición final de los residuos de PVC se recomienda buscar alguna forma más amigable para poder llegar a replicar esta investigación a mayor escala.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Asociación Nacional de la Industria Química., A. C. (2015). Libro PVC; Retrieved from [www.aniq.org.mx/premiopvc/assets/docs/Libro%20PVC-WEB](http://www.aniq.org.mx/premiopvc/assets/docs/Libro%20PVC-WEB).
- [2] Greenpeace. (2002). Datos, comparativas e impactos., 3-7. Retrieved from [https://archivos.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos\\_en\\_los\\_oceanos\\_LR.pdf](https://archivos.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos_en_los_oceanos_LR.pdf).
- [3] Kienyfe, Silvia, Gomez. En colombia incrementó la producción de plástico. 2018. <https://www.kienyke.com/medio-ambiente/en-colombia-incremento-la-produccion-de-plastico>.
- [4]. Algo Alternativo. Vida plástica: ¿Cuánto tiempo tardan los plásticos en degradarse? <https://www.algoalternativo.com/vida-plastica-cuanto-tiempo-tardan-los-plasticos-en-degradarse/>. Updated 2019. Accessed 27 de febrero de, 2020.
- [5] Diario Occidente. En Colombia se recicla solo el 7% del plástico. 2019. <https://occidente.co/colombia/en-colombia-se-recicla-solo-el-7-del-plastico/>.
- [6] Beatriz Posada Bustamante. (2000). La degradación de los plásticos; Reciclaje de PET:evaluación de la eficiencia de separación del contaminante PVC. Volumen 8, número 1, enero 2011
- [7] Beatriz Posada Bustamante. (2000). La degradación de los plásticos; N°94, 67- 94.

[8] Kırbaç Z, Keskin N, Güner A. Biodegradation of polyvinylchloride (PVC) by white rot fungi. Bull Environ Contam Toxicol. 1999;63(3):335342 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10475911>. doi: 10.1007/s001289900985.

[9] Ali, M. I., Ahmed, S., Robson, G., Javed, I., Ali, N., Atiq, N., & Hameed, A. (2014). Isolation and molecular characterization of polyvinyl chloride (PVC) plastic degrading fungal isolates. Journal of Basic Microbiology, 54(1), 18-27. doi:10.1002/jobm.201200496.

[10] Mexichem, S. A. B. (2018). Nuestra industria en plásticos; Retrieved from <http://www.mexichem.com.co/CloroVinilo/resinascolombia/pvc.html>

[11] Asipla Industriales del Plástico. (2016). *Estadísticas industria del plástico informe anual 2016*. (). Chile: Retrieved from <http://www.asipla.cl/wp-content/uploads/2017/05/Estad%C3%ADsticas-ASIPLA-2016-Datasur.pdf>

[12] Romano, D. (2014). Medio ambiente, construcción y PVC. Retrieved from <http://polired.upm.es/index.php/boletincfs/article/view/2299>

[13] O'brien, K. P., & Larson, A. (2007). La nueva generación de plásticos: un cuadro de innovación. *Poliantea*, 3(5) Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=4784591>

[14] María Carolina Ramírez. (2017, Miércoles, 17 de mayo de). Más de 30 toneladas de residuos de PVC son recicladas en Bogotá. *La Republica* Retrieved

from <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/mas-de-30-toneladas-de-residuos-de-pvc-son-recicladas-en-bogota-2510501>

[15] Icontec. (2011). Ntc 382. Retrieved from <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC382.pdf>

[16] *Organigrama de la comisión de las comunidades europeas* (1992). Luxembourg: OPOCE. Retrieved from <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:CB7392683:ES:HTML>

[17] Chiesa cattolica. (1992). *Dossier informativo* Retrieved from <http://data.theeuropeanlibrary.org/BibliographicResource/3000134493545>

[18] Acoplásticos. Plásticos en Colombia &nbsp; ISSN-0120-8624 X.2015; Informe20152016:111128. [www.acoplásticos.org/.../uns5pwq/files/assets/common/downloads/publication.pdf](http://www.acoplásticos.org/.../uns5pwq/files/assets/common/downloads/publication.pdf)

[19] Ferrer Nubia. &nbsp;la sociedad del PVC &nbsp; *Ecología Política*. 1996:111-121. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=153289>

[20] Asociación Nacional de la Industria Química., A. C. (2015). Libro PVC &nbsp; Retrieved from [www.anig.org.mx/premiopvc/assets/docs/Libro%20PVC-WEB](http://www.anig.org.mx/premiopvc/assets/docs/Libro%20PVC-WEB)

[21] Montes. B, Restrepo. A, McEwen J. (2003). Nuevos aspectos sobre la clasificación de los hongos y su posible aplicación médica. Medellín, Colombia.

[22] M. Bon. (2004). Guía de Campo de los Hogos de España y de Europa. Ed. Omega

[23] Vergaray, G., Cárdenas, K., Béjar, V., & Méndez, C. R. (2006). Aislamiento y caracterización de micromicetos biodegradadores de polietileno. *Revista peruana de biología*, 13(3), 203-205.

Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=2387483>

[24] Julio Cesar Molina Bastidas- Maria del Carmen Benitez-Julio Cesar Wilches-Julio Cesar Montoya. (2014). *Principios básicos sobre el principio del hongo comestible pleurotus spp&nbsp;*; (Primera Edición ed.). Cali, Colombia: Alternativa Producciones

[25] Ramesh, S., Leen, K. H., Kumutha, K., & Arof, A. K. (2007). FTIR studies of PVC/PMMA blend based polymer electrolytes. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 66(4), 1237-1242. doi:10.1016/j.saa.2006.06.012

[26] S. Kinugasa, K. Tanabe and T. Tamura. Spectral database for organic compounds, SDBS. Retrieved from [https://sdb.sdb.aist.go.jp/sdb/cgi-bin/cre\\_index.cgi](https://sdb.sdb.aist.go.jp/sdb/cgi-bin/cre_index.cgi)

[27] Universidad Nacional de Rosario. (2017) Volumetría de Complejos; 5 – 7

[28] Janajreh, I., Alshrah, M., & Zamzam, S. (2015). Mechanical recycling of PVC plastic waste streams from cable industry: A case study. *Sustainable Cities and Society*, 18, 13-20. doi:10.1016/j.scs.2015.05.003.

[29] Ren, X. (2003). Biodegradable plastics: A solution or a challenge? *Journal of Cleaner Production*, 11(1), 27-40. doi:10.1016/S0959-6526(02)00020-3.

[30] Ortega, J. J., Blanco, M., & Cuevas, Á. (1984). Acción de las radiaciones U.V. sobre el poli (cloruro de vinilo) flexible. *Materiales De Construcción*, 34(196), 43-48. doi:10.3989/mc.1984.v34.i196.937

[31] Ana Grisa VC. Degradação biológica do PVC em aterro sanitário e avaliação microbiológica. *Associação Brasileira de Polímeros São Paulo*. 2011;21:210-216.

[32] Domsch, K., Gams, W., & Anderson, T. (2007). Compendium of soil fungi (Segunda ed.). London: IHW-Verlag

[33] Campos Ad, Franchetti SMM. Biotreatment effects in films and blends of PVC/PCL previously treated with heat. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2005;48(2):235-243. [https://www.openaire.eu/search/publication?articleId=dedup\\_wf\\_001::f9d1e0066b1999673d6521bb1a3579d4](https://www.openaire.eu/search/publication?articleId=dedup_wf_001::f9d1e0066b1999673d6521bb1a3579d4). doi: 10.1590/S1516-89132005000200010.

[34] Veronica Cañedo y Teresa Ames. Manual de laboratorio para el manejo de hongos entomopatogenos; *Centro Internacional de la Papa*. 2004.

[35] Barnett H. & Hunter B. *Illustrated genera of imperfect fungi*. Tercera Edición ed. Pennsylvanie: Burgess Publishing Company; 1972.

[36] Pacasa-Quisbert F, Loza-Murguía MG, Bonifacio-Flores A, VINO-NINA L, Serrano-Canaviri T. Comunidad de hongos filamentosos en suelos del agroecosistema de k'iphak'iphani, comunidad choquenaira-viacha. *Journal of the Selva Andina Research*

25. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2072-92942017000100002&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942017000100002&lng=en&tlng=en).

[37] Luz C. G. A. panzarini, Selma M. L. Guedes. Caracterização de filmes de pvc enxertados e heparinizados via radiação gama por espectroscopia ftir

[38] Park, E., Park, B., Kim, Y., Canlier, A., & Hwang, T. (2018). Elimination and substitution compete during amination of poly(vinyl chloride) with ethylenediamine: XPS analysis and approach of active site index. *Macromolecular Research*, 26(10), 913-923. doi:10.1007/s13233-018-6123-z

[39] Vrabl, P., Schinagl, C. W., Artmann, D. J., Heiss, B., & Burgstaller, W. (2019). Fungal growth in batch culture - what we could benefit if we start looking closer. *Frontiers in Microbiology*, 10, 2391. doi:10.3389/fmicb.2019.02391

[40] Castañeda Alvarez, E., & Sánchez, L. C. (2016). Evaluación del crecimiento de cuatro especies del género bacillus sp., primer paso para entender su efecto biocontrolador sobre fusarium sp. *Nova*, 14(26), 53-65. doi:10.22490/24629448.1751

[41] Jeremy S. Webb, Marianne Nixon, Ian M. Eastwood, Malcolm Greenhalgh, Geoffrey D. Robson, Pauline S. Handley. Fungal colonization and biodeterioration of plasticized polyvinyl chloride. *Applied and Environmental Microbiology*. 2000;66(8):3194-3200. <http://aem.asm.org/content/66/8/3194.abstract>. doi: 10.1128/AEM.66.8.3194-3200.2000.

[42] Gu J. Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: Recent research advances. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2003;52(2):69-91. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830502001774>. doi: 10.1016/S0964-8305(02)00177-4.

[43] Kaczmarek, H., & Bajer, K. (2007). Biodegradation of plasticized poly(vinyl chloride) containing cellulose. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 45(8), 903-919. doi:10.1002/polb.21100]

[44] Montserrat Masdeu i Font, L E Q A LEQUIA, I M A, U G Sadurní Morera L E Q A LEQUIA, I M A, U G Clàudia Dragoste A G, S S T Xavier Ballell A G, . . . U G. *Análisis del ciclo de vida de la fase de construcción de la red de distribución de agua potable de girona, salt y sarrià de ter*

[45] Franco-Urquiza, E., Ferrando, H. E., Luis, D. P., & Maspoch, M. L. (2016). Reciclado mecánico de residuos plásticos. Caso práctico: Poliestireno de alto impacto para la fabricación de componentes de TV.73(575) Retrieved from <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/313760>

[46] Portafolio. (2019, 3 de septiembre de). ¿Que sabe de PVC? Retrieved from <https://www.portafolio.co/tendencias/que-sabe-de-pvc-bajas-tasa-de-reciclaje-en-el-pais-533233>

[47] SULAY ANDREA CASTELBLANCO RODRÍGUEZ, & GLORIA BEATRIZ PINO DÍAZ. *Estudio de una via de reciclaje del policloruro de vinilo (pvc) post-consumo*