

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL TRANSPORTE DE UN INSECTICIDA
QUÍMICO Y UN BIOINSECTICIDA EN UN SUELO CULTIVADO CON *Ananás*
Comosus (PIÑA) DEL MUNICIPIO DE LEBRIJA, SANTANDER**

MARTHA JHOANA ESTÉVEZ GÓMEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

AGOSTO DE 2019

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL TRANSPORTE DE UN INSECTICIDA
QUÍMICO Y UN BIOINSECTICIDA EN UN SUELO CULTIVADO CON *Ananás*
Comosus (PIÑA) DEL MUNICIPIO DE LEBRIJA, SANTANDER**

MARTHA JHOANA ESTÉVEZ GÓMEZ

**Proyecto de grado como requisito para optar al título de Magister en Ingeniería
Civil**

**Director:
Ing. SERGIO MANUEL PINEDA VARGAS PhD.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
AGOSTO DE 2019**

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, Agosto de 2019

Dedicado a Dios, a mis padres, hermana y futuro esposo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios, quien me dio la oportunidad de poder formarme como Ingeniera Ambiental Especialista y ahora Magister en Ingeniería Civil, quien me llena de sabiduría para cumplir mis metas y me bendice en cada paso que doy.

Gracias a Él, por darme unos padres ejemplares que me han formado en valores y han sido mí modelo a seguir, quienes siempre han puesto su confianza en mí y me han apoyado incondicionalmente. Ellos son el motor de mi vida, la razón de seguirlos llenando de alegría y orgullo.

A mi hermana, quien siempre ha sido mi compañía en los buenos y malos momentos, quien me comprende y me aconseja, con quien he crecido como persona y quien me llena de orgullo.

A mi novio y futuro esposo, por su gran apoyo y confianza. Quien me motiva a seguir cumpliendo metas y me fortalece con su paciencia y amor.

A mis excelentes docentes, los ingenieros Sergio Pineda y Sandra Villamizar, por ser ese gran modelo de personas y profesionales. Gracias por ser guía en este camino y por todos sus aportes de conocimiento. Gracias a su paciencia todo ha sido posible.

A la PhD. María Kopytko, quien ha sido la persona que ha guiado toda mi formación profesional durante mi experiencia universitaria, y ha sido responsable de mi crecimiento personal. Gracias por su amor y confianza.

Agradezco a todas aquellas personas que hicieron parte de este gran proceso, y quienes me ayudaron en la construcción de este sueño.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	15
1.1 Objetivo general.....	15
1.2 Objetivos específicos	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 El suelo.....	16
2.1.1 Composición del suelo	17
2.2 Propiedades físicas del suelo.....	17
2.2.1 Textura	18
2.2.2 Color	19
2.2.3 Porosidad.....	19
2.2.4 Humedad	19
2.2.5 Capacidad de campo	19
2.2.6 Densidad real	20
2.2.7 Densidad aparente.....	20
2.2.8 Estructura	20
2.2.9 Infiltración.....	20
2.2.10 Conductividad hidráulica	20
2.3 Propiedades químicas del suelo	22
2.3.1 Capacidad de intercambio catiónico	22
2.3.2 pH.....	22
2.3.3 Conductividad eléctrica.....	23
2.3.4 Carbono orgánico.....	23
2.3.5 Materia orgánica	23
2.4 Generalidades del cultivo de piña	24
2.4.1 Plagas que afectan el cultivo de piña	25

2.4.2	Plaguicidas utilizados en el cultivo de piña	26
2.5	Transporte de contaminantes en el suelo	32
2.5.1	Parámetros de transporte y disipación del insecticida químico Lorsban (Colpirifos) 38	
2.5.2	Factores que afectan el transporte del Insecticida Químico Lorsban:.....	40
2.6	Estado del Arte.....	41
3.	PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	44
3.1	Toma de muestras y caracterización del suelo	44
3.2	Estimación de parámetros de transporte para modelación	46
3.3	Comparación de los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los suelos tratados con el insecticida químico y el bioinsecticida.....	48
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
4.1	Caracterización inicial del suelo	50
4.2	Estimación de parámetros de transporte para modelación	51
4.3	Comparación de los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los suelos tratados con el insecticida químico y el bioinsecticida.....	53
4.4	Comparación de los cambios en la dispersión de los contaminantes del suelo tratado con el insecticida químico Lorsban y el Bioinsecticida.	59
5.	CONCLUSIONES	63
6.	RECOMENDACIONES	65
7.	BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXOS	73

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Composición mineralógica del suelo y distribución de las fases sólida, líquida y gaseosa.	17
Figura 2. Triángulo de texturas para la clasificación de suelos según la USDA.	18
Figura 3. Estimación del coeficiente C de Hazen	21
Figura 4. Aparición de la Cochinilla (<i>Dysmicoccus brevipes</i>) en la piña.....	26
Figura 5. Transporte de una sustancia contaminante si se presentara advección y difusión.....	33
Figura 6. Dispersión mecánica (longitudinal y transversal) de un fluido a través del medio poroso.....	36
Figura 7. Dispersión de un contaminante en un medio poroso, con inyección momentánea (7a) o continua (7b).	37
Figura 8. Condiciones experimentales	44
Figura 9. Montaje para determinación de la velocidad lineal media del flujo a través de un medio poroso.....	46
Figura 10. Pruebas de difusión del insecticida químico Lorsban a diferentes concentraciones.	47
Figura 11. Pruebas de difusión del insecticida biológico a diferentes concentraciones.	47
Figura 12. Cambio de la concentración en el perfil del suelo objeto de estudio.....	53
Figura 13. Cambio de la concentración en el tiempo del suelo objeto de estudio	53
Figura 14. Comparación en el cambio en la concentración del insecticida químico Lorsban en el perfil de suelo objeto de estudio. (a) Dispersión al inicio de estudio (b) Dispersión luego de tratar el suelo 8 meses con el insecticida químico Lorsban.	61
Figura 15. Comparación en el cambio en la concentración del Bioinsecticida en el perfil de suelo objeto de estudio. (a) Dispersión al inicio de estudio (b) Dispersión luego de tratar el suelo 8 meses con el Bioinsecticida.	61

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Propiedades de la materia orgánica y los efectos asociados en el suelo.	23
Tabla 2. Requerimientos nutricionales en el suelo para cultivo de Piña.	25
Tabla 3. Características y propiedades fisicoquímicas del insecticida químico Lorsban (Clorpirifos).....	27
Tabla 4. Valores de la Función de Error (erf) y la Función de Error Complementaria (erfc)....	35
Tabla 5. Degradación del Clorpirifos por hidrólisis (Vidas medias)	39
Tabla 6. Parámetros y métodos de análisis del suelo objeto de estudio.....	45
Tabla 7. Resultados de caracterización inicial de los suelos.....	50
Tabla 8. Parámetros de transporte para modelación del suelo al inicio del tratamiento experimental.....	51
Tabla 9. Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo blanco SB	54
Tabla 10. Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo control SC	55
Tabla 11. Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo fumigado con el bioinsecticida SFB	56
Tabla 12. Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo fumigado con Insecticida químico Lorsban SFQ.....	57
Tabla 13. Parámetros de transporte para modelación del suelo tratado con el insecticida químico Lorsban durante 8 meses.....	59
Tabla 14. Parámetros de transporte para modelación del suelo tratado con el bioinsecticida durante 8 meses.....	60

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Análisis comparativo del transporte de un insecticida químico y un bioinsecticida en un suelo cultivado con Ananás Comosus (Piña) del Municipio de Lebrija, Santander

AUTOR(ES): Martha Jhoana Estévez Gómez

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Sergio Manuel Pineda Vargas

RESUMEN

Este estudio presenta el análisis del transporte del insecticida químico Lorsban y un bioinsecticida a base de nicotina y capsaicina, aplicados en suelos cultivados con Ananás Comosus (Piña) en el Municipio de Lebrija, Santander. Para este efecto se tuvo en cuenta las áreas denominadas: suelo blanco (SB), sin cultivo y sin fumigación; suelo control (SC), sembrado con piña, sin fumigación; suelo SFQ, con siembra y fumigación con el insecticida químico Lorsban; y el suelo SFB, con siembra y fumigado con el bioinsecticida. Los cuatro suelos presentaron inicialmente igual textura franca arcillo arenosa, bajo contenido orgánico y un pH entre 4,25 y 4,65. Sin embargo, durante los 8 meses de experimentación, la textura del suelo SC y SFQ cambió a Franco arenoso, mientras que el suelo SFB mantuvo su estructura inicial, que se podría atribuir a la agregación del bioinsecticida. De igual manera se destaca para el suelo SFB un efecto favorable del bioinsecticida en el comportamiento del pH. Por su parte, el suelo fumigado con el insecticida químico SFQ, demuestra señales de deterioro dado el cambio en la textura. Bajo las condiciones iniciales, el modelo de transporte utilizando Hydrus, indicó que el insecticida químico presenta una baja dispersión dada su alta capacidad de adsorción a la fracción coloidal del suelo, así como su moderada permeabilidad y alta biodegradación; sin embargo, cuando el suelo es sometido al uso del insecticida químico Lorsban, se presentan alteraciones en las propiedades fisicoquímicas que incrementan la capacidad de dispersión del contaminante, y con ello, cambios en los aptitudes del suelo. Contrario a esto, los suelos tratados con el bioinsecticida no presentan cambios en la estructura, destacándose una baja posibilidad de ser lixiviado hacia el nivel freático debido a las partículas coloidales presentes que reducen la escorrentía superficial y la erosión, favoreciendo su retención para ser biodegradado.

PALABRAS CLAVE:

Plaguicidas, Ananás Comosus, dispersión, Lorsban, Hydrus.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Comparative analysis of the transport of a chemical insecticide and a bioinsecticide in a soil cultivated with Ananás Comosus (Pineapple) of the Municipality of Lebrija, Santander

AUTHOR(S): Martha Jhoana Estévez Gómez

FACULTY: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR: Sergio Manuel Pineda Vargas

ABSTRACT

This study presents the analysis of the transport of the chemical insecticide Lorsban and a bioinsecticide based on nicotine and capsaicin, applied in soils cultivated with Ananás Comosus (Piña) in the Municipality of Lebrija, Santander. For this effect, the so-called areas were considered: white soil (SB), without cultivation and without fumigation; control soil (SC), sown with pineapple, without fumigation; SFQ soil, with sowing and fumigation with the chemical insecticide Lorsban; and the SFB soil, sown and fumigated with the bioinsecticide. The four soils initially presented the same sandy clay loam texture, low organic content and a pH between 4.25 and 4.65. However, during the 8 months of experimentation, the texture of the SC and SFQ soil changed to sandy loam, while the SFB soil maintained its initial structure, which could be attributed to the aggregation of the bioinsecticide. Similarly, a favorable effect of the bioinsecticide on the pH behavior stands out for the SFB soil. For its part, the soil sprayed with the chemical insecticide SFQ, shows signs of deterioration given the change in texture. Under the initial conditions, the transport model using Hydrus, indicated that the chemical insecticide has a low dispersion given its high adsorption capacity to the colloidal fraction of the soil, as well as its moderate permeability and high biodegradation; however, when the soil is subjected to the use of the chemical insecticide Lorsban, there are alterations in the physicochemical properties that increase the dispersion capacity of the contaminant, and with it, changes in the soil's aptitudes. Contrary to this, the soils treated with the bioinsecticide do not present changes in the structure, highlighting a low possibility of being leached towards the water table due to the colloidal particles present that reduce surface runoff and erosion, favoring its retention to be biodegraded

KEYWORDS:

Pesticides, Ananas Comosus, dispersion, Lorsban, Hydrus.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Las fuentes hídricas y los suelos se ven constantemente afectados por actividades antrópicas, entre estas las prácticas agrícolas y mineras inadecuadas y los vertimientos de residuos líquidos y sólidos contaminantes que repercuten negativamente el ambiente. Ejemplo de esta situación se da por el uso y aplicación de plaguicidas, y aunque ha contribuido en gran medida al control de enfermedades endémicas y al mejoramiento e incremento de la productividad del campo y la inversión económica debido a los daños causados por las plagas que pueden repercutir en la pérdida de aproximadamente el 40% de la producción (Atlas &Bartha, 2002; Casanellas et al., 2010), el uso excesivo, indiscriminado y sin control de estos productos ha traído consigo la aparición de plagas resistentes, el deterioro del suelo y la disminución de la capacidad de regeneración biológica, así como también, contaminación de fuentes hídricas y la pérdida de las propiedades mecánicas del suelo afectado (Serrano y Restrepo, 2006).

En Colombia, de acuerdo con el Anuario de frutas y hortalizas de 2006 – 2010, la piña se cultiva en 23 departamentos a nivel nacional; año en donde en el departamento de Santander se concentró el 51,6% de la producción nacional, seguido del Valle del Cauca con el 14,2% y el Caquetá con el 12,9% (ICA, 2012). Para el 2018, según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Santander y Norte de Santander han sido considerada como la zona de mayor producción con 12.027 hectáreas que equivale al 47% de la producción nacional. Es así como la piña sigue afianzado al departamento de Santander como el primer productor del país. El cultivo se centra en tres municipios, encabezado por Lebrija con 59.4%, seguido de Rionegro con 20.5% y Girón con el 19% (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MADR, y otros 2006).

Actualmente, el cultivo de piña atraviesa un buen momento en Colombia, debido a los mercados internacionales que se han abierto para la fruta colombiana; sin embargo, gran preocupación se desenlaza debido a la demanda de fertilizantes y plaguicidas. Las plagas asociadas al cultivo de la piña son factores limitantes dentro de su producción ya que causan graves pérdidas para los agricultores. Algunas de las enfermedades más comunes en la piña es la peca o mancha del fruto, causada por un hongo que penetra por la flor abierta y ataca inicialmente un solo ojo o frutillo (ICA, 2012).

Los compuestos ampliamente utilizados para controlar la proliferación y los efectos nocivos de las diferentes plagas que afectan los cultivos de piña en Colombia son los plaguicidas fosforados, específicamente los compuestos fosforotionatos, como el paratión o clorpirifos (Lorsban 4EC), los cuales poseen un grupo funcional =S (azufre) mejor que un grupo =O (oxígeno) para su unión a P (fósforo) (Stanley, 2000). El insecticida químico Lorsban, cuyo ingrediente activo es el Chlorpyrifos, es un insecticida organofosforado que se clasifica como moderadamente tóxico (clase II) de acuerdo con el Institute for Environmental Toxicology (1997), y moderadamente persistente en suelos, ya que se reporta una vida media entre los 60 y 120 días; no obstante, Márquez (2001) establece que este plaguicida puede permanecer en el suelo hasta veinte años, dependiendo de su concentración, el tipo de suelo y las condiciones ambientales predominantes. Por su parte, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) registra el Chlorpyrifos como un compuesto que presenta baja movilidad en el suelo y que, debido a su poca

solubilidad en agua, resulta ser un compuesto de baja dispersión y con gran potencial de ser adsorbido por la fracción coloidal del suelo (EPA, 2004).

Recientemente, la Universidad Pontificia Bolivariana obtuvo el registro de patente de un producto de origen natural (patente registrado NC2016/0005724). Se trata de un bioinsecticida a partir del extracto de nicotina y capsaicina, el cual ha demostrado importante efectividad al atacar simultáneamente dos insectos: *Dysmicoccus brevipes* (Cochinilla o piojo blanco) y hormigas del género *Solenopsis* (hormiga de fuego), *Pheidole* (hormiga cabezona) e *Iridomyrmex* (hormiga argentina), que conviven en una simbiosis que deteriora el cultivo de la piña y los cítricos; un compuesto que puede reemplazar los plaguicidas fosforados de alto impacto en estos cultivos (Kopytko & Mujica, 2007).

En Colombia los estudios de modelación matemática de contaminantes en suelos son escasos, lo que influye en la falta de información para establecer la predicción del comportamiento de los plaguicidas liberados en el ambiente, necesaria para diagnosticar y minimizar impactos adversos luego de su aplicación, así como los cambios en las características de los suelos sometidos a dichos compuestos. Serrano et al (2012), analizaron tiempos de viaje para aceites de carros, simulando accidentes de derrames en columnas de suelo de naturaleza arenosa, encontrando que a medida que el tamaño de la partícula disminuye, también es menor la capacidad de los fluidos para desplazarse en el medio poroso, y por ello resulta mayor el tiempo de recorrido. Este se explica a partir de los medios más finos, donde se requiere un mayor recorrido del fluido para atravesar una mayor superficie específica; así como los cambios asociados a la disminución de aptitudes del suelo para uso agrícola y la pérdida de oportunidad de uso del suelo para otras aplicaciones industriales o comerciales y de infraestructura, dado el crecimiento de la frontera agrícola.

Teniendo en cuenta lo anterior, es de gran importancia considerar en los análisis de transporte de contaminantes en el suelo, la composición de éste en términos de textura dada su composición variada y las distintas formas de acomodación de los granos con respecto a su tamaño, así como el porcentaje de sólidos y poros ocupados por aire y/o por contenidos líquidos. De esta manera, el transporte de los contaminantes puede darse en forma gaseosa, líquida o permanecer en la fase sólida por procesos de adsorción a la matriz del suelo, según las propiedades químicas de los compuestos (Serrano et al., 2010).

La dispersión de estas sustancias a través del medio poroso supone un riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una de las principales fuentes de abastecimiento en el municipio de Lebrija, debido a la escasez hídrica que conllevó a la calamidad declarada en el año 2015 por efectos del fenómeno del niño, y a partir de estudios que determinan el desarrollo de alternativas en la región direccionadas hacia el uso de agua subterránea (Gómez y Guzmán, 2011). Así mismo, los suelos contaminados representan riesgo de alteración en la salud de las comunidades que dependen económicamente de la productividad de estas tierras, o beneficiadas de obras de infraestructura construidas sobre éstos que, sin el previo conocimiento de la situación, podría repercutir en altos costos.

Con el fin de superar esta dificultad, surge el interés por modelar numéricamente el problema para predecir el destino físico de un insecticida químico y un bioinsecticida en el suelo, luego de ser aplicado en los cultivos de piña estudiados en el municipio de Lebrija, Santander; entendiendo que la causa común de alteración del suelo corresponde

a actividades de riego o derrames de plaguicidas y/o sustancias de manejo agrícola. La modelación se realiza a partir de ecuaciones matemáticas que definen los mecanismos de transporte de un fluido a través del medio poroso teniendo en cuenta la caracterización fisicoquímica del suelo de interés y de las sustancias objeto de estudio, así como su variación en el tiempo.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Comparar el transporte de un insecticida químico y un bioinsecticida en suelos cultivados con *Ananás comosus* (Piña) del municipio de Lebrija, Santander, a través del modelamiento numérico utilizando el software Hydrus.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar fisicoquímicamente los suelos objeto de estudio con el fin de parametrizar la modelación de transporte de los insecticidas.
- Modelar numéricamente la dispersión de un insecticida químico y un bioinsecticida, en suelos cultivados con *Ananás comosus* (Piña) del municipio de Lebrija, Santander.
- Establecer la comparación de los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los suelos tratados con el insecticida químico y el bioinsecticida, y los efectos tras su dispersión en el medio analizado.

2. MARCO TEÓRICO

Los problemas de contaminación de suelos y aguas subterráneas son consecuencia directa del desarrollo de nuestra moderna sociedad industrializada. El crecimiento demográfico incide en la necesidad de obtener la cantidad de alimentos suficientes para satisfacer la demanda. No obstante, para alcanzar y mantener un equilibrio entre las especies vegetales deseadas y sus competidores, se requiere el uso de fertilizantes químicos y plaguicidas los cuales, aunque propician el incremento de la producción, a su vez causan deterioro de los suelos implicados en estas actividades agrícolas. (Atlas &Bartha, 2002; Casanellas *et al.*, 2010).

A comienzos del siglo XX los compuestos químicos empleados en la agricultura tenían origen natural, siendo extraídos de los residuos animales, vegetales y a partir de minerales. Hoy en día se emplean una gran variedad de compuestos derivados del petróleo como son plaguicidas: compuestos altamente tóxicos que ocasionan la alteración del equilibrio de especies de fauna, flora, y de la microbiota del suelo, afectando la salud de las comunidades y de los consumidores finales (Eweis *et al.*, 1999).

El aumento de la frontera agrícola pone en riesgo a los suelos sometidos a la aplicación desmedida de plaguicidas, que con el tiempo causan deterioro y disminuyen las posibilidades de ser utilizados en otros sectores productivos. No obstante, las consecuencias de deterioro y pérdida de capacidad de uso de los suelos pueden ser más extensas, debido a que los contaminantes se transportan de forma impredecible en el entorno. En este sentido, en la medida en que el medio es más fino, se requiere un mayor recorrido para atravesar la matriz porosa, es decir que el contaminante presenta una dispersividad menor con respecto a medios más gruesos y con mayor porosidad, cuyos tiempos de viaje a través del suelo son más cortos y representan un riesgo de contaminación más alto (Serrano *et al.*, 2010).

2.1 El suelo

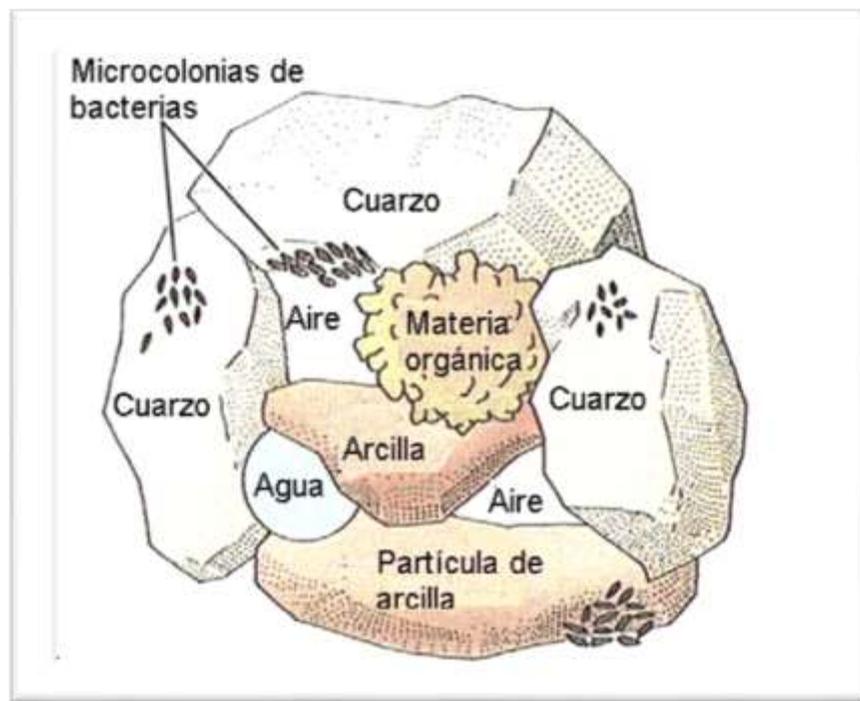
El suelo es la interfaz en donde interactúan la atmósfera, litosfera, hidrosfera y biosfera. Proporciona soporte físico y nutriente para el crecimiento de las plantas y los microorganismos.

Los suelos son sistemas ecológicos dinámicos que proporcionan los requisitos esenciales para la vida de las plantas y de todos los ecosistemas terrestres incluyendo una gran población de microorganismos; ofreciendo nutrientes, agua (H₂O), oxígeno (O₂), y soporte. El suelo también es necesario para sostener la vida humana, ya que proporciona los recursos naturales, el sitio y soporte para las viviendas y carreteras; y actúa como un medio de reciclaje o desintoxicante de materiales de desecho que se producen diariamente, para la protección de las aguas subterráneas por el filtrado de químicos y tóxicos (Pierzynski, Thomas, y Vance, 2005).

2.1.1 Composición del suelo

Los suelos, por lo general, están compuestos por: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos (Figura 1). Los inerales constituyen los principales componentes estructurales del suelo y suponen más del 50% del volumen total. El aire y el agua en conjunto representan el volumen de los poros que, generalmente ocupan entre el 25 y 50% del volumen total, situación que condiciona las posibilidades de transportar compuestos en medio líquido o gaseoso y de dispersarse en la matriz del suelo hacia otras zonas no saturadas o aguas subterráneas. Por su parte, la materia orgánica oscila entre el 3 y 6% del volumen, componente que favorece ciertos comportamiento e interacciones entre la fase sólida y los compuestos que se introducen al suelo (Eweis *et al.*, 1999).

Figura 1. Composición mineralógica del suelo y distribución de las fases sólida, líquida y gaseosa.



Fuente: Atlas y Bartha (2002). Ecología microbiana y Microbiología ambiental.

Las propiedades fisicoquímicas de los suelos influyen en gran medida sobre la aireación, la disponibilidad de nutrientes y la retención de agua y, por lo tanto, en la actividad biológica.

2.2 Propiedades físicas del suelo

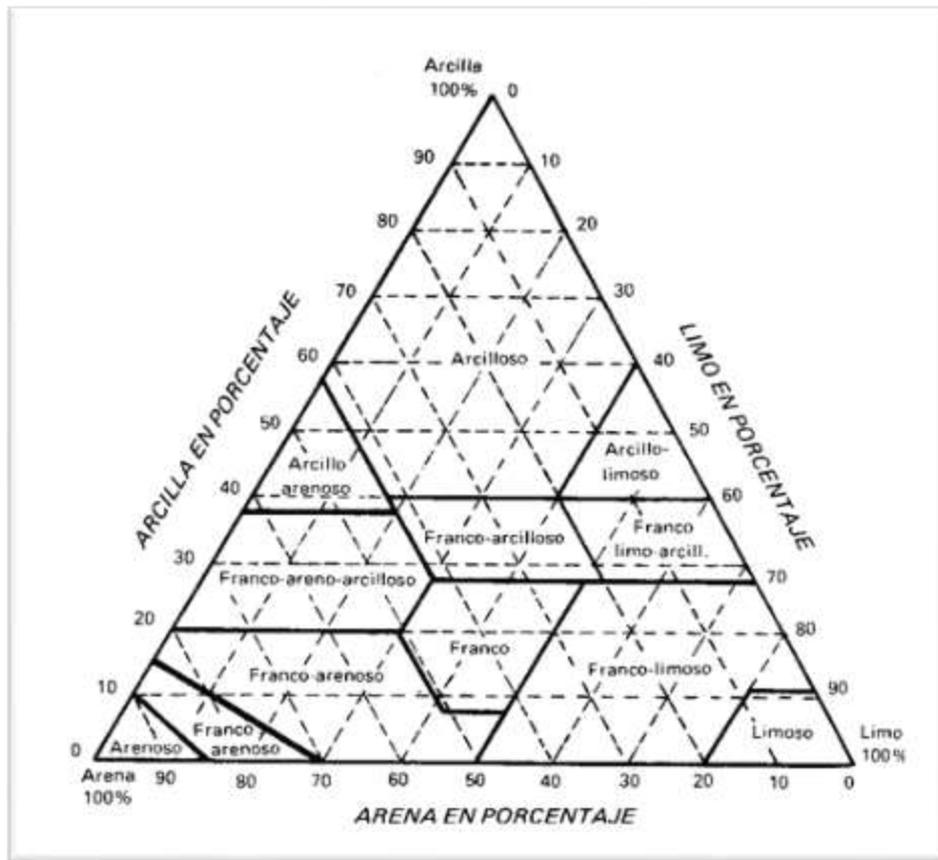
Algunas de las propiedades del suelo que se describen a continuación, tienen gran importancia en los mecanismos de transporte y movilidad de un fluido en el suelo tales como la advección, difusión o dispersión; así como el análisis de las interacciones y/o transformación de los contaminantes por procesos de biodegradación, adsorción, precipitación, o diversas reacciones químicas.

2.2.1 Textura

Establece las relaciones de arena, limo y arcilla presentes en el suelo. Esta composición influye directamente en la aireación, movilidad de fluidos, retención de humedad, retención y liberación de iones, y por ende su productividad, uso y manejo (Mirsal, 2008).

Con la ayuda del diagrama triangular de clasificación de un suelo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) que se muestra en la Figura 2, y de la proporción relativa de las partículas, puede determinarse el tipo y la clase textural del suelo (USDA tomado de Atlas y Bartha, 2002).

Figura 2. Triángulo de texturas para la clasificación de suelos según la USDA.



Fuente: Atlas y Bartha, 2002.

La proporción en que se encuentren los diferentes tamaños o tipos de partículas del suelo, constituyen una propiedad importante para el desarrollo de los microorganismos, ya que determina el área superficial disponible como hábitat para el crecimiento de los microorganismos del suelo, responsables de los ciclos del carbono y de nutrientes para el sostenimiento de la productividad. De esta forma, los suelos con mayor composición de arcilla ofrecen mayor área de superficie de contacto que aquellos en los que predominan las partículas de arena, cuyo tamaño es mayor que las partículas de arcilla (Atlas y Bartha, 2002). Esta relación influye de igual manera en la capacidad filtrante que poseen los suelos frente a las funciones de amortiguar e inmovilizar materiales y sustancias tóxicas

de naturaleza orgánica o inorgánica, así como regular y repartir el flujo de agua. Cuanto más finas son las partículas del suelo, un fluido requiere mayor tiempo para atravesar la matriz porosa, y por ende la capacidad de dispersarse en el suelo disminuye (USDA, 2008).

2.2.2 Color

Es una característica muy notoria del suelo, y se relaciona directamente con los componentes sólidos del mismo. Además, ésta característica ayuda a identificar el efecto de algunos procesos pedogenéticos y se relaciona con la composición de suelo. El típico color oscuro de muchos suelos es causado por la materia orgánica; parámetro que permite predecir a simple vista, su estado y calidad. El color del suelo puede determinarse mediante espectrofotómetros, pero para fines prácticos, se emplea un catálogo de colores conocido como “La tabla de colores Munsell” mediante comparación con el suelo en estudio (Mirsal, 2008).

2.2.3 Porosidad

Hace referencia al volumen o espacio disponible en el suelo para la fase líquida y gaseosa, es decir, al espacio que no está ocupado por sólidos. Esta característica dependerá de la textura, contenido de materia orgánica y la estructura del suelo, pudiéndose presentar micro o macroporosidad. Los macroporos permiten un drenaje rápido y mejor aireación en el suelo. Los microporos, por su parte, favorecen el almacenamiento de agua, así como de los contaminantes, características determinantes para los análisis de transporte y movilidad de estos (Mirsal, 2008).

En términos de volumen, los suelos minerales tienen aproximadamente un 35-55% de espacio poroso, mientras que los suelos orgánicos 80-90% de espacio de poros. Pero el espacio total de poros del suelo puede variar considerablemente por una variedad de razones, incluyendo la mineralogía del suelo, la densidad aparente, el contenido de materia orgánica, y la perturbación o degradación de la estructura. Suelos de textura arenosa, a pesar de tener un tamaño de poros mayor, tienden a tener menos espacio total de poros que en los suelos arcillosos (Paul, 2007).

2.2.4 Humedad

La humedad hace referencia a la cantidad de agua que posee el suelo, y está directamente influenciada por la textura, contenido de materia orgánica, fracción mineral y orgánica, aporte natural o artificial de agua y el gasto por evapotranspiración en el suelo. Suelos arcillosos y/o con altos contenidos de materia orgánica, presenta una mayor humedad.

La humedad de un suelo influye significativamente sobre la actividad biológica. El agua es el componente principal del protoplasma bacteriano y un contenido adecuado de esta, resulta fundamental para el crecimiento y la estabilidad microbiana. No obstante, el contenido de agua en la matriz del suelo representa un medio de transporte para los contaminantes, cuando no existe ningún tipo de interacción con el medio geológico y son susceptibles de ser arrastrados.

2.2.5 Capacidad de campo

Es una propiedad asociada a la humedad del suelo, pues se refiere a la máxima cantidad de agua retenida por el suelo, luego de que sus poros han drenado completamente. Se llega a esta humedad después de dejar drenar el suelo saturado (después de lluvia o riego), entre 48 y 72 horas; el agua en esta condición está retenida a tensiones comprendidas

entre -0.1 y -0.3 atm (Eweis *et al.*, 1999). La capacidad de campo de un suelo oscila normalmente entre el 18 y 30% en peso y es función del contenido de arcilla, representando la capacidad de retener y acumular sustancias contaminantes al interior del suelo (Eweis *et al.*, 1999).

2.2.6 Densidad real

Esta propiedad corresponde al peso de las partículas sólidas del suelo, con respecto al volumen que éstas ocupan, sin considerar el volumen ocupado por los poros (agua y aire).

La densidad real del suelo es la masa de una partícula por volumen (mg/m^3 o g/cm^3); el volumen ocupado por los poros y el peso del agua no está incluido en la medición. La densidad real de los suelos varía, por lo general, entre 2,60 y 2,75 g/cm^3 , con un valor medio de 2.65 g/cm^3 (Pierzynski *et al.*, 2005).

2.2.7 Densidad aparente

Contrario a la densidad real, la densidad aparente corresponde al peso de las partículas sólidas del suelo, en relación con el volumen de la muestra inalterada, es decir, teniendo en cuenta el volumen que es ocupado por los poros (aire y agua). Es una medida dada en masa por volumen y resulta útil para estimar el tipo de minerales presentes en el suelo y el grado de compactación de éste.

La densidad aparente es una medida dada en masa por volumen (mg/m^3 o g/cm^3) de un suelo. Los suelos, por lo general, tienen densidades aparentes entre 1,0 g/cm^3 y 1.8 g/cm^3 . Los suelos con densidades altas (por ejemplo, 2,0 g/cm^3) probablemente tendrán una permeabilidad e infiltración del agua lenta, lo cual puede resultar en encharcamiento o escorrentía superficial, y causar una reducción en el crecimiento de las raíces de las plantas y un limitado flujo o intercambio de gas (O_2) (Pierzynski *et al.*, 2005).

2.2.8 Estructura

Corresponde a la unión de las partículas del suelo (arena, limo y arcilla), para formar agregados o unidades estructurales. Es una propiedad que depende de la genética del suelo y se describe a partir del grado de desarrollo (Mirsal, 2008). La estructura determina en gran medida las propiedades mecánicas del suelo, principalmente al movimiento de fluidos, a partir de la infiltración, la retención de agua y la aireación. Suelos cuyas partículas están sueltas y no adheridas entre sí, se definen como deficientes de estructura o con una estructura de grano simple. Mientras que suelos con partículas estrechamente unidas, frecuentemente se definen como poseedores de estructura en masa, situación que también condiciona la capacidad de transportarse un fluido a través del medio poroso (Eweis *et al.*, 1999).

2.2.9 Infiltración

Propiedad del suelo que evalúa la velocidad de entrada del agua al suelo. Se ve afectada por el contenido de humedad, la permeabilidad y tipo de poros, homogeneidad del perfil, presencia de materiales hidrofóbicos en el suelo y el tiempo que tarda el suministro de agua (Mirsal, 2008).

2.2.10 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica indica las posibilidades que tiene el agua para moverse al interior del suelo. Ésta depende del contenido de humedad y el tamaño de poros, y obtiene valores máximos cuando el suelo se encuentra saturado debido a que todos los poros se

encuentran llenos de agua y actúan como conductores (Mirsal, 2008). En materiales granulares como el suelo, la conductividad hidráulica (K) se puede evaluar a partir de la granulometría y la porosidad. Algunas de las aproximaciones más sencillas se han evaluado por Hazen en 1911 (Weight, 2008), U.S. Bureau of Reclamation (Kasenow, 2002); y otras más complejas por Vukovic y Soro 1992 (Odong, 2007) (en Sánchez, s.f.)

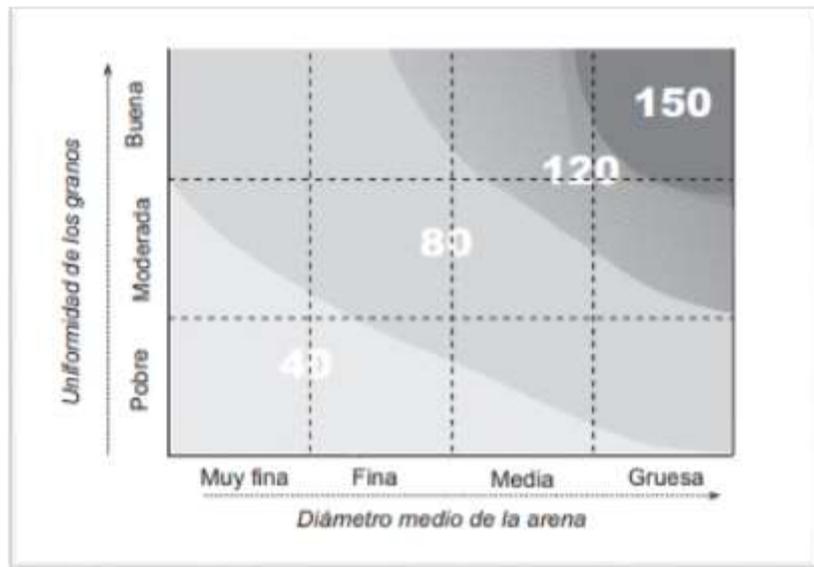
La expresión de Hazen (1911) es muy útil dada su sencillez:

$$K \left(\frac{m}{día} \right) = 8,64 * C * d_{10}^2$$

donde d_{10}^2 = diámetro (mm) que deja pasar el 10% de los granos (10% menos, 90% mayor)

C = coeficiente que depende del tamaño del grano y de la uniformidad, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 3. Estimación del coeficiente C de Hazen



Fuente: Weight, 2008, en Sánchez, s.f.

Para evaluar la uniformidad se utiliza el coeficiente de uniformidad U :

$$U = d_{60} / d_{10}$$

donde: d_{60} = diámetro que deja pasar el 60% de los granos

d_{10} = diámetro que deja pasar el 10% de los granos

Por su parte, la expresión del U.S. Bureau of Reclamation, es más sencilla que Hazen:

$$K \left(\frac{m}{día} \right) = 311 * C * d_{20}^{2.3}$$

donde d_{20} = diámetro (mm) que deja pasar el 20% de los granos (20% menos, 80% mayor)

Finalmente, una de las expresiones más complejas tiene la siguiente estructura (Vukovic y Soro 1992, en Sánchez, s.f):

$$K = \frac{g}{\nu} * [Coef. uniformidad] * [Función de la porosidad] * d_e^2$$

Donde:

d_e = diámetro efectivo, que en algunas fórmulas es d_{10} , en otras debe calcularse

g = aceleración de la gravedad

ν = viscosidad cinemática

El *Coefficiente de Uniformidad* y la *Función de la porosidad* varían de unas fórmulas a otras. La versión más simplificada de Kozeny-Carman (Sánchez, s.f, tomada de Odong, 2007) es quizá la más aceptada:

$$K = \frac{g}{\nu} * 8.3 \times 10^{-3} \left[\frac{m^3}{(1-m)^2} \right] d_{10}^2$$

donde: K = conductividad hidráulica (m/s)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

ν = viscosidad cinemática (m^2)

m = porosidad

d_{10} = diámetro 10% (metros)

2.3 Propiedades químicas del suelo

Los contenidos de arcilla y materia orgánica son los principales factores que contribuyen a las reacciones químicas en los suelos, en procesos que incluyen la retención de agua, intercambio catiónico y aniónico, la sorción de compuestos inorgánicos y orgánicos, amortiguamiento de pH, así como la creación de numerosas interacciones físicas, químicas y biológicas del suelo, que son esenciales para la fertilidad, estructura y calidad ambiental de los suelos (Pierzynski *et al.*, 2005).

2.3.1 Capacidad de intercambio catiónico

Es aquella capacidad que posee un suelo para adsorber cationes y es equivalente a la carga negativa presente. Mediante esta propiedad, se define la cantidad de sitios disponibles para almacenar cationes en el suelo. Los cationes más importantes en los procesos de intercambio catiónico son Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , y Na^{2+} (bases del suelo) y NH_4^+ (en suelos ácidos) (Mirsal, 2008). En suelos agrícolas, la capacidad de intercambio catiónico permite evaluar la adsorción de los plaguicidas en su fracción coloidal (Quinchía, Gómez, Palencia & Giraldo, 2006).

2.3.2 pH

El pH del suelo corresponde a la medida de la concentración de iones H^+ en la solución que se encuentra en los poros del suelo, la cual alcanza un equilibrio a partir de las superficies cargadas negativamente por parte de las partículas que lo conforman. En suelos, el pH resulta ser un parámetro químico de mayor importancia, ya que interviene

en la disponibilidad de ciertos nutrientes y por lo tanto, en el desarrollo de organismos vivos en el suelo (Mirsal, 2008). Este parámetro puede ser modificado por procesos de manejo agrícola que incluyen la aplicación de fertilizantes y pesticidas, y los requerimientos propios del cultivo; por ejemplo, en los cultivos de piña se requiere un pH en el suelo entre 5.5 y 6.2 (Guido M *et al.*, 1983).

2.3.3 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica indica la cantidad de sales presentes en el suelo en mezcla agua-suelo. Generalmente los suelos contienen sales, que son esenciales para el desarrollo de las plantas, sin embargo, un exceso de éstas inhibe el crecimiento. El exceso de sales puede darse de forma natural por composición original del suelo, o como resultado del uso y manejo de éste. La conductividad eléctrica detecta la cantidad de cationes o aniones (sales) en el suelo. Los iones asociados con salinidad son Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , H^+ (cationes), o HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^- , OH^- (aniones) (USDA, 1999).

2.3.4 Carbono orgánico

Es el conjunto de todas las formas bajo las que se presenta el carbono, es decir, el carbono total del suelo. La importancia de esta propiedad se fundamenta en la influencia directa e indirecta que tiene sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En muchas ocasiones, el carbono procedente de compuestos químicos de tipo orgánico, pueden acumularse en la fracción sólida por su afinidad a las partículas de arcilla y materia orgánica (Vela, López y Rodríguez, 2012).

2.3.5 Materia orgánica

Está constituida por los desechos de origen animal y vegetal. Algunos de los beneficios que trae consigo el contenido de materia orgánica en el suelo son: reducir la escorrentía superficial y la erosión; favorecer la agregación en el suelo; mejorar la capacidad de retención de agua; actuar como depósito de nutrientes, fuente de energía y alimento para los microorganismos; ayudar a la solubilización de nutrientes y mejorar la capacidad de intercambio catiónico. La materia orgánica desempeña un papel importante en la dinámica química de los suelos. Está compuesta por una mezcla muy compleja de compuestos de carbono (C) que también contienen nitrógeno (N), azufre (S), y fósforo (P). Las propiedades de la materia orgánica y su efecto en los suelos se observan en la Tabla 1 (Pierzynski *et al.*, 2005).

Tabla 1. Propiedades de la materia orgánica y los efectos asociados en el suelo.

Propiedad	Observaciones	Efectos en el Suelo
Color	El típico color oscuro de muchos suelos es causado por la materia orgánica.	Puede facilitar el calentamiento
Retención de agua	La materia orgánica puede contener hasta 20 veces su peso en agua.	Mejora las propiedades de retención de agua, principalmente en suelos arenosos.
Combinación con minerales de arcilla	Formación de unidades estructurales llamados agregados.	Permite el intercambio de gases; estabiliza la estructura; aumenta la permeabilidad.

Propiedad	Observaciones	Efectos en el Suelo
Quelación	Forma complejos estables con Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , y otros cationes polivalentes.	Mejora la disponibilidad de nutrientes para las plantas superiores.
Solubilidad en agua	La insolubilidad de la materia orgánica es debido a su asociación con la arcilla.	No ocurre pérdida de materia orgánica por lixiviación.
Acción Buffer	Efecto buffer en rangos ligeramente ácidos, neutros y alcalinos.	Ayuda a mantener uniforme el pH del suelo.
Intercambio catiónico	La acidez total de la materia orgánica va desde 300 a 1400 cmol/kg.	Incrementa la capacidad de intercambio catiónico del suelo
Mineralización	Descomposición de los productos de la materia orgánica CO_2 , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , y SO_4^{2-} .	Fuente de nutrientes para el crecimiento de las plantas.
Combinación con xenobióticos	Afecta la persistencia y biodegradabilidad de los pesticidas.	Fuerte afinidad a la materia orgánica aumenta persistencia y acumulación de compuestos orgánicos en el suelo.

Fuente: Pierzynski, Thomas, y Vance, 2005

2.4 Generalidades del cultivo de piña

La Piña, conocida científicamente como *Ananas comosus*, pertenece a la familia Bromeliaceae, al género Ananás. Todas las Bromeliaceas son originarias de América y más exactamente de América del Sur de los estados tropicales de Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais y Sao Paulo en Brasil, así como el Norte de Paraguay y Argentina; aunque actualmente está difundida en muchas regiones tropicales del mundo, como lo es Colombia (Guido M *et al.*, 1983). Esta planta se desarrolla en su mayoría en los primeros 15 centímetros del horizonte del suelo, caracterizado presentar alta porosidad.

Los factores ambientales que afectan el crecimiento y el rendimiento del cultivo de la piña son: la temperatura, pluviosidad, luminosidad, altitud, vientos, y suelos. La temperatura óptima oscila entre 22 y 30°C; temperaturas inferiores aceleran la floración disminuyendo el tamaño del fruto y haciéndolos más ácidos y percederos; y temperaturas superiores puede quemar la epidermis ocasionando el fenómeno conocido como golpe de sol o insolación. En cuanto a la pluviosidad, la piña resulta poco exigente en agua y tiene gran resistencia a la deshidratación; produce mejor en zonas con precipitación anual entre 1.000 y 1.500 mm la cual se considera óptima. Por otra parte, la luz influye notablemente en la coloración del fruto; sin embargo, una iluminación muy intensa causa quemaduras en la superficie de la fruta. Así mismo, este cultivo debe protegerse de los fuertes vientos debido a que puede tumbar la fruta con facilidad. El éxito en el cultivo de la piña se consigue en la mayor parte de los trópicos, entre los 100 y 800 msnm. Puede cultivarse

en la mayoría de los suelos, siempre que sean profundos, fértiles y que tengan buen drenaje. La relación óptima del pH del suelo varía entre 5.5 y 6.2; suelos con pH elevados dan lugar a la aparición de “clorosis calcárea” (deficiencia de hierro) en la planta, mientras que pH bajos generan deficiencias de potasio y calcio. Los suelos destinados al cultivo de la piña deben tener una permeabilidad tal que, favorezca el drenaje y evite el encharcamiento (Guido M *et al.*, 1983).

De acuerdo con el Boletín mensual de insumos y factores asociados a la producción agropecuaria, las principales características del cultivo de la piña (*Ananas Comosus*) corresponden a zonas con pendientes no mayores al 25% y altitudes entre los 800 y los 1200 m.s.n.m. Suelos permeables y de buena aireación, con textura franca y de preferencia no arcillosos, con pH entre 5 y 5,8 (DANE, 2016). Se desarrollan en áreas que no sean propensas a inundaciones, con una profundidad de la cama mínimo de 40 cm para un buen desarrollo de raíces y alta porosidad para favorecer infiltración del agua. Los niveles medios de nutrientes requeridos por el cultivo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Requerimientos nutricionales en el suelo para cultivo de Piña.

Elemento	Rango
N	1,6-2,0
P	0,15-0,20
K	3,6-4,0
Ca	0,3-0,4
Mg	0,25-0,3
Fe	80-90
B	15-20
Zn	25-35

Fuente: Asohofrucol, s.f.

2.4.1 Plagas que afectan el cultivo de piña

De acuerdo con el Plan Frutícola del departamento de Santander, la mayor demanda de plaguicidas corresponde a los cultivos de especies de piña, mora y melón, seguido de la sandía, guanábana, el maracuyá y la pitaya. En cuanto al uso de fertilizantes químicos la mayor demanda recae sobre la piña con 1.750 kg/ha (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MADR, y otros 2006). Las plagas y enfermedades en el cultivo de la piña son factores limitantes dentro de su producción ya que causan graves pérdidas para los agricultores. Las enfermedades que ataca comúnmente a la planta de piña son, entre otras, la peca o mancha del fruto causada por un hongo (ICA, 2012).

Entre las plagas más importantes en los cultivos de piña según los estudios realizados, se destaca a la "queresa harinosa" *Pseudococcus maritimus*; "la queresa hemisférica" *Saissetia coffeae*; "el perforador de los frutos" *Metamasius hemipterus* L; los hongos *Fusarium* sp. Y *Penicillium* sp; la abeja *Trigona spinipes*; "la broca de la piña" *Techla basilides*; la "Mosca de los frutos de la piña" *Melanoloma conpilosum*; y la "cochinilla o piojo blanco" *Dysmicoccus brevipes* (Arellano et al., 2015).

Figura 4. Aparición de la Cochinilla (*Dysmicoccus brevipes*) en la piña



Fuente: Asohofrucol, s.f.

Los *Dysmicoccus brevipes* es un insecto muy destructor del orden Homoptera y pertenecen a la familia *Pseudococcidae* del Phylum: Arthropoda, Es principalmente una plaga de los cítricos, también conocida como *Unaspis citri* (Davinson et al., 1992). Los *Dysmicoccus brevipes* conviven en simbiosis con hormigas del género *Solenopsis* sp (hormiga de fuego), *Pheidole* sp (hormiga cabezona) e *Iridomyrmex* sp (hormiga argentina), deteriorando el cultivo de la piña y los cítricos (Banacol, 2013). Las hormigas protegen a la cochinilla de depredadores, mientras que se alimentan de las mielecillas producidas por éstas. No obstante, las hormigas alteran la estructura del suelo y su agregación, aumentando la porosidad y permeabilidad.

2.4.2 Plaguicidas utilizados en el cultivo de piña

Los compuestos ampliamente utilizados para controlar la proliferación y los efectos nocivos de las diferentes plagas que afectan los cultivos de piña en Colombia son los plaguicidas fosforados, específicamente los compuestos fosforotionatos, como el paratión o clorpirifos (Lorsban 4EC), los cuales poseen un grupo funcional =S (azufre) mejor que un grupo =O (oxígeno) para su unión a P (fósforo) Estos compuestos presentan una mayor toxicidad insecto: mamífero que aquellos no azufrados (Stanley, 2000).

Las investigaciones orientadas a determinar los daños relacionados con la exposición crónica a plaguicidas coinciden en que los compuestos organofosforados de uso común y los plaguicidas organoclorados, pueden tener efectos duraderos en el sistema nervioso, aumentando el riesgo de demencia y enfermedad de Alzheimer en la vejez (Hayden, 2010).

2.4.2.1 Plaguicidas químicos organofosforados

Los plaguicidas organofosforados son compuestos que contienen fósforo, algunos de los cuales son ésteres orgánicos del ácido orto fosfórico, como el paraoxón (Stanley, 2000).

La mayoría son insecticidas y otros también acaricidas. En su mayor parte actúan contra los insectos y los ácaros por contacto y por ingestión; otros tienen acción fumigante. La mayoría de ellos son tóxicos a los peces, abejas y a la vida silvestre. Son sustancias de baja persistencia en el ambiente (Comisión intersecretarial para el control del proceso y uso de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas (CICOPLAFEST, 1991 & NAS, 1978).

En los plaguicidas organofosforados uno o más de los oxígenos del ácido pueden encontrarse sustituidos por azufre y sus radicales oxidrilos por diferentes radicales orgánicos, encontrándose de esta manera, una gran variedad de combinaciones (CICOPLAFEST, 1991). Los oxofosforados (enlaces P=O) son fuertemente inhibidores, mientras que los tiofosforados (P=S) no son fuertemente inhibidores y necesitarán de una biotransformación a la forma oxo para actuar como inhibidores (PLM, 2006).

Debido a que los ésteres contienen el grupo funcional P=S (tiono) y no son tan efectivos como los compuestos P=O, presentan una mayor proporción de toxicidad insecto: mamífero que aquellos no azufrados. Por lo tanto, la actividad insecticida de estos compuestos requiere conversión metabólica de P=S a P=O (desulfuración oxidativa). Por lo anterior, los insecticidas organofosforados resultan ser más efectivos que los compuestos organoclorados porque los primeros están propensos a sufrir biodegradación y no bioacumulación (Stanley, 2000).

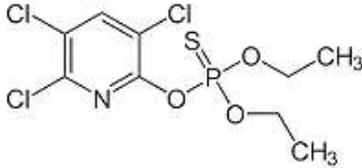
La interacción plaguicida – entorno resulta importante dada las consecuencias de contaminación del ambiente, sobre todo en aplicaciones aéreas donde el producto aplicado puede terminar en el suelo o cuerpos de agua, y ser transportado y contaminar otras áreas debido al arrastre producido por los vientos, o por escorrentía como resultado del lavado ocasionado por las lluvias. No obstante, los plaguicidas organofosforados presentan importante ventaja de ser degradados biológicamente y químicamente de forma rápida a materiales atóxicos. (Badii & Varela 2008).

Lorsban:

El insecticida químico Lorsban, cuyo ingrediente activo es el Chlorpirifos y los ingredientes aditivos son solventes, emulsificantes y compuestos relacionados, es un insecticida clorado organofosforado de amplio espectro y recomendado para el control de plagas en diversos cultivos, entre ellos, la piña.

Tabla 3. Características y propiedades fisicoquímicas del insecticida químico Lorsban (Clorpirifos)

Parámetro	Insecticida Lorsban
Ingrediente activo	Clorpirifos 480 g/L: 0,0-diethyl 0-3,5,6-trichloro-2-pyridyl phosphorothioate, de formulación a 20 °C.
Fórmula	C ₉ H ₁₁ Cl ₃ NO ₃ PS

Parámetro	Insecticida Lorsban
	
Clasificación	Organotiofosfato
Apariencia y Color	Líquido ámbar.
Estado Físico	Líquido concentrado emulsionable.
Olor	A mercaptan, típico del solvente.
Densidad Relativa	1,076 g/mL (a 20 °C).
Masa molar	350,59 g/mol
Acidez / Alcalinidad	pH = 5,19 (a 25 °C).
Presión de Vapor	< 10 mm de mercurio a 25°C Presión intermedia a vapor OMS (2009) 1.43 mPa (25°C)
Punto de Ebullición	143 °C.
Punto de fusión	42 °C
Solubilidad en Agua	0.941 mg/l at 20° C. Baja solubilidad en agua (OMS*, 2009; EFSA**, 2005) 2 mg/L (25 °C)
Coefficiente de división octanol/agua	Log K _{ow} = 5.0 at 24.5°C Log K _{ow} = 4.7 at 20°C (OMS, 2009)
Coefficiente de absorción del suelo, K _{oc}	652-30,381 L/kg Alta absorción especialmente en suelos de alto contenido orgánico Gebremariam et al (2012)

Parámetro	Insecticida Lorsban
<p>Coefficiente de distribución (Kd)</p> <p>Análisis de adsorción</p>	<p>130 mL/g</p> <p>(Rodríguez, 2006)</p>
<p>Absorción en sedimento acuático, K_{oc}</p>	<p>3,000-25,565 L/kg</p> <p>Mean = 13,439 L/kg</p> <p>Median = 15,500 L/kg</p> <p>Afinidad relativamente más alta para sedimento acuático que para suelo Gebremariam et al (2012)</p>
<p>Corrosividad</p>	<p>No corrosivo para los materiales de envases aprobados.</p>
<p>Viscosidad</p>	<p>3,0 centistocke = 0,03 m²/s</p>
<p>Ecotoxicología</p>	<p>Organismos acuáticos y peces: Moderadamente tóxico. CL50 (pez cebra) 96 horas = 2.96 mg/l.</p> <p>Aves: Moderadamente tóxico. DL50 oral aguda (codorniz) = 170 mg/kg.</p> <p>Abejas: Altamente tóxico. DL50 por contacto = 0.31 µg/abeja</p>
<p>Metabolitos toxicológicamente relevantes del clorpirifos</p>	<p>3,5,6-trichloro-2-pyridinol (TCP). Importancia: primaria (EFSA, 2005)</p>
	<p>3,5,6-trichloro-2-methoxypyridine (TMP). Importancia: secundaria (EFSA, 2005)</p>
	<p>O-ethyl-O-(3,5,6-trichloro-2-pyridoyl) phosphorothioic acid (phosphorothioate). Importancia: No informada (EFSA, 2005)</p>
	<p>Clorpirifos oxon. Importancia: menor (US EPA***, 2009)</p>

Parámetro	Insecticida Lorsban									
Persistencia en el suelo	<p>Baja, la degradación se produce en el término de días a semanas. En condiciones aeróbicas, vida media = 30-60 días.</p> <p>La vida media es más larga en suelos orgánicos que en suelos minerales (Gebremariam et al 2012).</p> <p>Los criterios del Anexo D1 de la Convención de Estocolmo aseguran que hay “evidencia de que la sustancia química es de alguna manera suficientemente persistente para justificar su consideración dentro del ámbito de esta convención” (Watss, 2012).</p> <p>En estudios basados en tratamientos con termiticidas, utilizando tasas de aplicación de 700 a 1,000 mg/kg, las vidas medias excedían el umbral de 180 días. El informe más alto que se reporta llega a 1.576 días</p>									
Persistencia en sedimentos	Se ha reportado una vida media de 223 días para sedimento en aguas superficiales bajo condiciones anaeróbicas (Watss, 2012)									
Fotólisis en agua	Vida media = 3-4 semanas.									
Volatilización	Máximo un 10% de volatilización (EPA, 2004)									
Hidrolisis	<p>Es relativamente estable a hidrólisis en un pH natural y soluciones acuosas ácidas. Su estabilidad disminuye a medida que aumenta el pH.</p> <p>Vidas medias (degradación por hidrolisis)</p> <table border="1" data-bbox="766 1792 1388 1948"> <thead> <tr> <th data-bbox="766 1792 925 1836">pH</th> <th data-bbox="925 1792 1244 1836">Temperatura</th> <th data-bbox="1244 1792 1388 1836">Días</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="766 1836 925 1881">4.7 – 5</td> <td data-bbox="925 1836 1244 1881">25°C</td> <td data-bbox="1244 1836 1388 1881">63 – 75</td> </tr> <tr> <td data-bbox="766 1881 925 1948">6.9 – 7</td> <td data-bbox="925 1881 1244 1948">25°C</td> <td data-bbox="1244 1881 1388 1948">15 – 35</td> </tr> </tbody> </table>	pH	Temperatura	Días	4.7 – 5	25°C	63 – 75	6.9 – 7	25°C	15 – 35
pH	Temperatura	Días								
4.7 – 5	25°C	63 – 75								
6.9 – 7	25°C	15 – 35								

Parámetro	Insecticida Lorsban		
	8.1	25°C	25
La dosis letal (DL50) para la absorción por la piel en ratas es mayor a 2000 mg/kg para los dos ingredientes activos			
La dosis letal (DL50) oral del clorpirifos para ratas está entre 100 y 250 mg/kg.			
La dosis letal media (DL50) oral para ratas machos es 247 mg/kg y de 309 mg/kg para hembras, con cipermetrina.			

*OMS: Organización Mundial de la Salud. ** EFSA: European Food Safety Authority. *** US EPA: United States Environmental Protection Agency

Fuente: Dow AgroSciences, 2013.

El Lorsban es un insecticida clorado organofosforado que se clasifica como medianamente tóxico (clase II) por el Institute for Environmental Toxicology (1997), y moderadamente persistente en suelos con una vida media entre los 60 y 120 días; sin embargo, según Márquez (2001), cuenta con un rango de actividad que puede comprender desde hasta los veinte años, condición que depende del tipo de suelo, clima, método y dosis de aplicación.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) reporta el Chlorpyrifos como un compuesto de baja movilidad en el suelo y que, debido a su poca solubilidad en agua, presenta un alto potencial para ser adsorbido en la fracción coloidal del suelo y por ende, una menor posibilidad de llegar a las aguas subterráneas, y su llegada a las aguas superficiales ocurre más por erosión que por lixiviación (EPA, 2004).

El principal metabolito de degradación del clorpirifos es el 3,5,6-trichloro-2-pyridinol TCP, caracterizado por presentar una toxicidad similar al clorpirifos para pájaros, mamíferos y agua corriente, así como para peces en estuarios y mares y para invertebrados; mientras que el Clorpirifos Oxon puede ser más tóxico que clorpirifos para estos organismos (US EPA 2009). De acuerdo con la EPA (2006) se destaca el TCP como un metabolito de degradación móvil en suelos, pero persistente cuando no está expuesto a luz, con una permanencia significativa luego de 365 días de su aplicación, asociado a su vez, por presentar una solubilidad en agua de 80.9 mg/L, considerablemente más alta que el compuesto original (1.05 mg/L para clorpirifos).

El Chlorpyrifos puede ser degradado por hidrólisis, fotólisis y por vía biológica. Gallo (2004) ha demostrado los efectos negativos del Chlorpyrifos sobre el desarrollo de la rana *Smilisca phaeota*. No obstante, Qinchía et al., 2006, determinaron la compatibilidad de un consorcio bacteriano nativo aislado de un suelo proveniente del Oriente Antioqueño sometido a la aplicación del Lorsban 4 EC, con *Pseudomonas* sp, y su potencial biodegradador del insecticida Lorsban a 480, 4.800, 24.000 y 48.000 ppm. Del mismo modo, Lopera y compañía (2005), demostraron que el clorpirifos puede degradarse en presencia del hongo *Phanerochaete chrysosporium* en concentraciones iniciales desde 0,95 a 9,4 µg/g hasta en un 96,3%, y sin utilizar el hongo en un 24,07%, debida posiblemente a la acción de factores como evaporación e hidrólisis del plaguicida durante

el proceso de incubación y/o su adsorción por partículas del suelo como arcillas y materia orgánica; sin embargo, Zhou et al., 2007 encontraron que los clorpirifos muestran efectos adversos sobre el crecimiento y la fecundidad en lombrices de tierra expuestas a 5 mg / kg de clorpirifos después de ocho semanas. Por su parte Pino y Peñuela (2011) aislaron un consorcio microbiano de suelos altamente contaminados en Moravia (Medellín, Colombia), y compuesto por *P. vulgaris*, *Acinetobacter sp*, *Flavobacterium sp*, *P. putida*, *C. freundii*, *P. aeruginosa*, *Bacillus sp*, *Stenotrophomonas sp*, *Pseudomonas sp* y *Proteus sp*; que demostró la capacidad de degradar el metil paratión y el clorpirifos en el medio de cultivo y el suelo en 120 horas.

De acuerdo con el NMFS (National Marine Fisheries Service) la estabilidad hidrolítica, combinada con la fotólisis acuosa, así como la baja volatilización y degradación bajo condiciones aeróbicas, supone que el clorpirifos (componente activo del Lorsban) puede ser persistente en las aguas de algunos sistemas acuáticos con tiempos de residencia hidrológica considerablemente largos (NMFS, 2008). En sedimentos, la persistencia de clorpirifos aumenta significativamente bajo condiciones anaerobias (Bondarenko & Ghan 2004).

Así mismo, se destaca que la disipación de clorpirifos en el suelo es más rápida bajo condiciones tropicales, por proceso de fotodegradación. Por lo tanto, este compuesto resultaría más persistente en condiciones oscuras y en el frío (Watss, 2012).

2.4.2.2 Bioinsecticidas utilizados en cultivos de piña

El uso de medios biológicos para combatir el ataque de insectos y otras plagas que dañan las cosechas supone una alternativa razonable y viable, de fácil aplicación y sin efectos negativos en los cultivos, la salud humana y en el ambiente en general (Duran, 2003).

Recientemente, la Universidad Pontificia Bolivariana obtuvo el registro de patente de un producto de origen natural (patente registrado NC2016/0005724). Se trata de un bioinsecticida a partir del extracto de nicotina y capsaicina en proporciones optimizadas, el cual ha demostrado importante efectividad al atacar simultáneamente dos insectos: *Dysmicoccus brevipes* (Cochinilla o piojo blanco) y hormigas del género *Solenopsis* (hormiga de fuego), *Pheidole* (hormiga cabezona) e *Iridomyrmex* (hormiga argentina), que conviven en una simbiosis que deteriora el cultivo de la piña y los cítricos. El bioensayo de toxicidad fue realizado en un extenso rango de concentraciones, aplicadas en laboratorio y verificadas en el campo. Las pruebas experimentales evidenciaron el efecto tóxico de este producto comparado con el insecticida químico de uso comercial y que es aplicado tradicionalmente en la zona de cultivo de la piña en el Municipio de Lebrija, Santander (Kopytko & Mujica, 2007).

2.5 Transporte de contaminantes en el suelo

Una vez se han aplicado los plaguicidas en el suelo producto de las actividades agrícolas, pueden manifestar fenómenos de transporte a través de arrastre y/o lixiviación, convirtiéndolos en contaminantes potenciales para las aguas superficiales y subterráneas dada su elevada toxicidad para la fauna acuática. Por lo anterior, es necesario identificar los suelos agrícolas susceptibles de favorecer procesos de lixiviación de contaminantes

y/o cambios en sus propiedades fisicoquímicas que conlleven a cambios en el uso de la tierra (Sánchez, 2010 & Brock y otros, 2000).

La movilidad de las sustancias a través de suelo está relacionada con la existencia de espacios que le permitan su paso por el medio poroso. En este sentido, se refiere a la capacidad de distribución de los contaminantes en el medio geológico (dispersividad), y de esta forma entender el comportamiento del suelo y subsuelo.

Cuando el arrastre de una sustancia contaminante se da a través del agua, se habla de **advección**; en este sentido, se podría indicar que el contaminante viaja a la misma velocidad que el agua. En suelos, el flujo de masa a través de una sección unidad perpendicular al flujo es igual a:

$$J = m_e \cdot C \cdot v$$

Donde:

J : flujo de masa, por unidad de sección y por unidad de tiempo

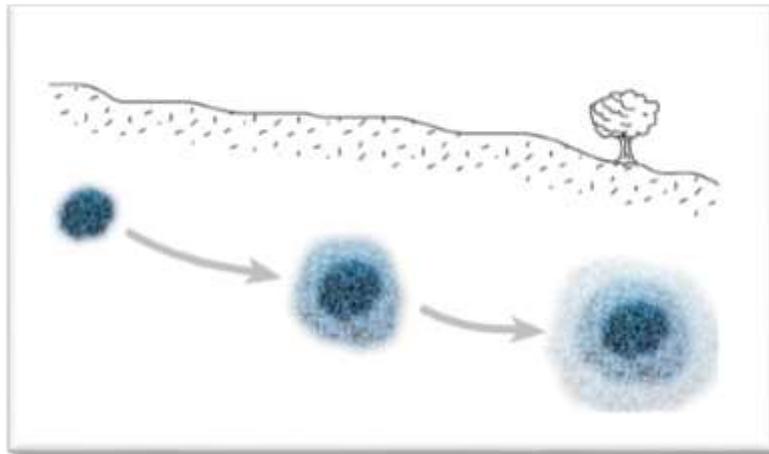
m_e : porosidad eficaz

C : concentración

v : velocidad lineal media (= velocidad Darcy / m_e)

Si el contaminante llega al suelo y después de un periodo de tiempo determinado éste se ha ampliado y difuminado, se está presentando un fenómeno de transporte denominado **difusión**. Este mecanismo puede darse de forma simultanea con la advección y presentarse lo que se muestra en la siguiente figura:

Figura 5. Transporte de una sustancia contaminante si se presentara advección y difusión



Fuente: Sánchez, 2012

Esta situación evidencia que las sustancias disueltas en el agua se mueven por un gradiente de concentraciones, de los puntos de mayor concentración a los de menor concentración. En un medio poroso, la difusión se ve influenciada por aspectos como la

porosidad eficaz y la tortuosidad, y se expresa mediante la siguiente ecuación (Fetter, 2001, 1999):

$$D^* = D_m \cdot w$$

Donde:

D^* : Coeficiente de difusión efectiva

D_m : Coeficiente de difusión

w : Coeficiente que depende del medio poroso. Este coeficiente puede variar de 0,01 a 0,5 (Freeze & Cherry, 1979).

Una expresión más específica de la difusión según Coutelieiris (2012):

$$D^* = D_m \cdot m_e \cdot \frac{\delta}{\tau^2}$$

m_e : porosidad eficaz

δ : Factor de constricción (dificultad de circular moléculas grandes a través de poros pequeños).

τ : Tortuosidad (longitud recorrida/longitud en línea recta)

Sin embargo, debido a que los coeficientes τ y δ son desconocidos, este mismo autor simplifica la ecuación estableciendo que:

$$D^* = D_m \cdot (m_e)^c$$

c : coeficiente (1,8 a 2,0 para materiales consolidados; 1,3 para arenas no consolidadas).

Teniendo en cuenta lo anterior, el flujo de masa por difusión, regido por la primera Ley de Fick, para un medio poroso se tiene que:

$$F = -D^* \frac{dC}{dx}$$

Donde:

F : flujo de masas por unidad de tiempo y por unidad de sección perpendicular al flujo (M/T).

D^* : Coeficiente de difusión efectiva

$\frac{dC}{dx}$: gradiente de concentraciones: entre dos puntos situados a una distancia dx existe una diferencia de concentración dC .

No obstante, la expresión anterior no considera el tiempo, por lo que resulta conveniente conocer la segunda ley de Fick. De esta manera se puede conocer cómo aumenta la concentración de un contaminante en un punto situado a x metros de distancia del sitio de aplicación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Para un medio poroso, una solución de esta ecuación fue expresada por Crank (1956, en Delleur, 1999):

$$C(x, t) = C_o \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D^* \cdot t}}$$

Donde:

C_o : Concentración inicial del contaminante

$C(x, t)$: Concentración a una distancia x transcurrido un tiempo t .

D^* : Coeficiente de difusión efectiva

erfc: Función error complementaria, está tabulada (ver tabla 4)

Tabla 4. Valores de la Función de Error (erf) y la Función de Error Complementaria (erfc)

x	erf(x)	erfc(x)	x	erf(x)	erfc(x)
0	0	1	1,3	0,9340079	0,0659921
0,05	0,0583720	0,9416280	1,4	0,9522851	0,0477149
0,1	0,1124629	0,8875371	1,5	0,9661051	0,0338949
0,15	0,1679960	0,8320040	1,6	0,9763484	0,0236516
0,2	0,2227026	0,7772974	1,7	0,9837905	0,0162095
0,25	0,2763264	0,7236736	1,8	0,9890905	0,0109095
0,3	0,3286268	0,6713732	1,9	0,9927904	0,0072096
0,35	0,3793821	0,6206179	2	0,9953223	0,0046777
0,4	0,4283924	0,5716076	2,1	0,9970205	0,0029795
0,45	0,4754817	0,5245183	2,2	0,9981372	0,0018628
0,5	0,5204999	0,4795001	2,3	0,9988568	0,0011432
0,55	0,5633234	0,4366766	2,4	0,9993115	0,0006885
0,6	0,6038561	0,3961439	2,5	0,9995930	0,0004070
0,65	0,6420293	0,3579707	2,6	0,9997640	0,0002360
0,7	0,6778012	0,3221988	2,7	0,9998657	0,0001343
0,75	0,7111556	0,2888444	2,8	0,9999250	0,0000750
0,8	0,7421010	0,2578990	2,9	0,9999589	0,0000411
0,85	0,7706681	0,2293319	3	0,9999779	0,0000221
0,9	0,7969082	0,2030918	3,1	0,9999884	0,0000116
0,95	0,8208908	0,1791092	3,2	0,9999940	0,0000060
1	0,8427008	0,1572992	3,3	0,9999969	0,0000031
1,1	0,8602051	0,1397949	3,4	0,9999985	0,0000015
1,2	0,87103140	0,12896860	3,5	0,9999993	0,0000007

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) \quad ; \quad \operatorname{erf}(-x) = -\operatorname{erf}(x) \quad ; \quad \operatorname{erfc}(-x) = 1 + \operatorname{erf}(x)$$

Fórmula de cálculo aproximada:

$$\operatorname{erf}(x) = \operatorname{signo}(x) \sqrt{1 - \exp\left(-x^2 \frac{\frac{4}{\pi} + 0,147 \cdot x^2}{1 + 0,147 \cdot x^2}\right)}$$

La función *signo* (x) vale +1 si x es positivo o -1 si x es negativo (Tomado de Sánchez, 2012).

Debido a que la difusión es un fenómeno muy lento, sólo sería aplicable en medios donde la difusión sea la única causa de movimiento del soluto y en grandes periodos de tiempo. Por lo tanto, se estudia el movimiento del fluido a través del medio poroso, conocido como **dispersión mecánica**; que puede darse en el sentido del flujo (longitudinal) y lateralmente (transversal), como se muestra en la figura 6 (Sánchez, 2012).

Figura 6. Dispersión mecánica (longitudinal y transversal) de un fluido a través del medio poroso

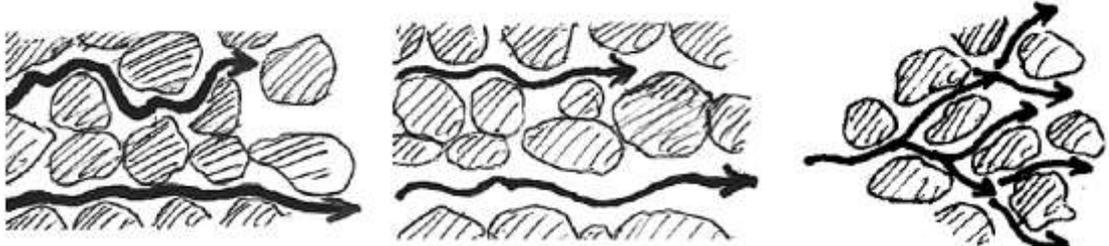


Fig. 6a. Dispersión longitudinal por la tortuosidad

Fig. 6b. Dispersión longitudinal por amplitud de los canales

Fig. 6c. Dispersión transversal

Fuente: Sánchez, 2012

La dispersión mecánica longitudinal es debida a las moléculas que encuentran caminos más tortuosos y se retrasan, o a aquellas que encuentra caminos más anchos y avanzan más rápido, pensando en un medio homogéneo. Sin embargo, la heterogeneidad del suelo aumentará la dispersión, retrasando a las moléculas que encuentren zonas menos permeables. Por su parte, la dispersión transversal, se debe a los constantes caminos que encuentra el fluido (Sánchez, 2012).

Debido a que la dispersión longitudinal siempre es mayor que la transversal, la mancha contaminante adquirirá una forma alargada en el sentido del flujo. Esta capacidad que tiene el medio poroso de dispersar un fluido que circula en él, se conoce como dispersividad dinámica α (unidades de longitud). De ésta se distingue la dispersividad dinámica longitudinal α_L (sentido del flujo) y la dispersividad dinámica transversal α_T (en sentido transversal) (Sánchez, 2012).

$$\alpha_L = 0,83 (\text{Log (Longitud del fluido recorrida)})^{2,414}$$

(Fetter, 1999)

La dispersión mecánica, por tanto, se expresa bajo la siguiente ecuación:

$$D_{\text{dispersión mecánica}} = \alpha \cdot v$$

α : Dispersividad dinámica (Longitud)

v : velocidad lineal media (Longitud/Tiempo)

Existe otro fenómeno de transporte de contaminantes en el suelo que se desarrolla en acción conjunta con la difusión y la dispersión mecánica, denominada, **dispersión hidrodinámica** (D) y se expresa:

$$D = \text{dispersión mecánica} + \text{coeficiente de difusión efectiva}$$

Es decir, que, considerando la dirección del flujo, se obtienen las siguientes expresiones:

$$D_L = \alpha_L \cdot v \cdot D^*$$

$$D_T = \alpha_T \cdot v \cdot D^*$$

Donde:

D_L, D_T : coeficiente de dispersión hidrodinámica (longitudinal, transversal)

α_L, α_T : coeficientes de dispersividad dinámica (longitudinal, transversal)

v : velocidad lineal media (velocidad Darcy / porosidad eficaz)

D^* : Coeficiente de difusión efectiva

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede demostrar que la dispersión hace que la mancha contaminante se expanda mucho más, con respecto a lo considerado sólo por difusión y advección, tal como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Dispersión de un contaminante en un medio poroso, con inyección momentánea (7a) o continua (7b).

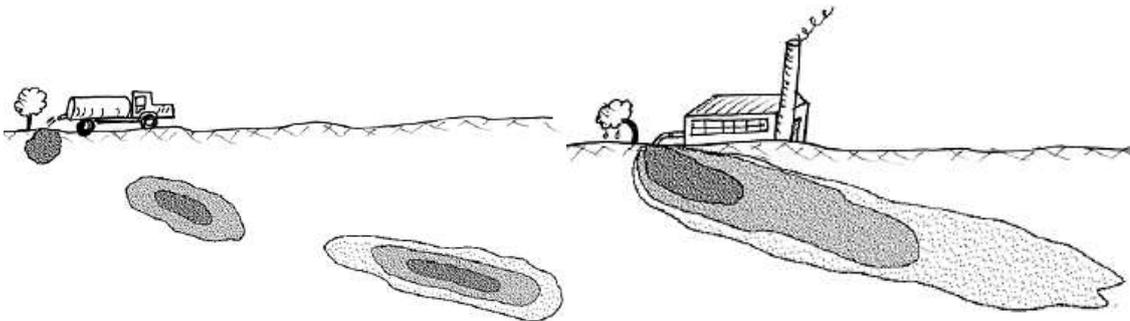


Fig. 7a. Inyección momentánea

Fig. 7b. Inyección continua

Fuente: Sánchez, 2012.

La solución analítica considerando los efectos de la dispersión y la difusión de manera conjunta en el transporte de un contaminante, puede resultar compleja. Una primera aproximación se da simplificando el problema a una dimensión, y de esta manera, se considera que, en el caso de un tubo relleno de arena con una velocidad de flujo constante, el fluido presenta una concentración C_o en la entrada, y a la salida se da de manera gradual. Por lo tanto, la concentración a una distancia x y transcurrido un tiempo t , puede calcularse mediante la ecuación de **Ogata – Banks**, simplificada cuando el tiempo o la distancia son grandes (1961; en Fetter 1999, Hiscock, 2005):

$$C_{(x,t)} = \frac{C_o}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right]$$

o

$$C_{(x,t)} = \frac{C_o}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{\alpha_L vt}} \right) \right]$$

Cuando se asume que, dentro de la dispersión hidrodinámica, la difusión puede despreciarse frente a la dispersión mecánica (Domenico, 1998).

Es importante destacar que, los contaminantes que se movilizan por la matriz del suelo pueden sufrir algún tipo de interacción con el medio geológico, por ejemplo, adsorción, absorción, intercambio iónico, precipitación química, biodegradación, reacciones de oxidación - reducción, entre otras. Estos procesos pueden generar retardo de las sustancias en su recorrido por el suelo; transformación en otros compuestos o metabolitos; o atenuación, quedando retenidas en la fracción sólida; fenómenos de gran importancia en los estudios de transporte (Sánchez, 2012).

La sorción (que involucra los fenómenos de *adsorción* o adherencia de una sustancia a la superficie de un sólido, y la *absorción* que implica la penetración de la sustancia al interior del sólido), puede provocar atenuación, transformación y principalmente, un retardo en el que las moléculas del contaminante que es arrastrado por el agua se retiran provisionalmente por su adherencia a los minerales del suelo, y posteriormente se van incorporando al flujo. En este proceso influyen dos grandes aspectos: las características del contaminante (pueden ser iones, moléculas no cargadas, polares o no polares) y las características del suelo (textura, permeabilidad, porosidad, contenido orgánico, entre otras) (Sánchez, 2012).

La siguiente expresión involucra el factor de retardo al aplicar la fórmula de Ogata-Banks:

$$C_{(x,t)} = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Rf x - vt}{2\sqrt{Rf\alpha_L vt}} \right) \right]$$

Rf : factor de retardo (adimensional), que depende de un coeficiente de distribución (o partición):

$$Rf: 1 + \frac{\rho_a}{m_e} K_d$$

(Domenico, 1998).

Donde:

ρ_a : densidad aparente

m_e : porosidad eficaz

K_d : coeficiente de distribución (unidades: L³/M)

2.5.1 Parámetros de transporte y disipación del insecticida químico Lorsban (Colpirifos)

El Clorpirifos (componente activo del Lorsban) puede degradarse por procesos bióticos y abióticos. Así mismo, este compuesto puede moverse a través de la zona no saturada y saturada del suelo, mediante procesos de transporte donde el contaminante no tiene ningún tipo de interacción con el medio geológico, como lo es la advección, difusión y dispersión (parámetros a estimar en esta investigación y que se describen en el capítulo anterior).

Degradación Abiótica:

La degradación del Clorpirifos se da lentamente bajo condiciones tanto aerobias como anaerobias en el suelo. El principal metabolito de degradación es el TCP, compuesto altamente persistente cuando no hay presencia de luz (EPA, 2006).

- **Evaporación**

En la literatura se reporta a Clorpirifos bajo diversos criterios de volatilidad (no volátil, de volatilidad intermedia, o volátil), sin embargo, la volatilización debe considerarse en los análisis de dispersión. El clorpirifos resulta volátil en condiciones tropicales sobre la base de una presión de vapor de 1.43 mPa (25°C) y de la Constante de Henry de 2.8×10^{-04} (Pesticide Properties Data Base PPDB, 2012).

Por otra parte, la EFSA reporta el siguiente comportamiento del clorpirifos frente a su volatilidad: volatilización desde la superficie de las plantas correspondiente al 79-81% en 24 horas; y la volatilización desde el suelo es igual a 22-26% en 24 horas (no se menciona la temperatura) (EFSA, 2005).

- **Hidrólisis**

Los principales metabolitos de degradación del clorpirifos por hidrólisis son TCP y O-ethyl-O- (3,5,6-trichloro-2-pyridoyl) phosphorothioic acid (phosphorothioate) (EFSA, 2005). La degradación hidrolítica es una de las principales rutas de degradación abiótica para suelos alcalinos (pH alto), pero se inhibe en concentraciones altas de este compuesto (Racke et al 1996).

Tabla 5. Degradación del Clorpirifos por hidrolisis (Vidas medias)

pH	Temperatura	Días
4.7 – 5	25°C	63 – 75
6.9 – 7	25°C	15 – 35
8.1	25°C	25

Fuente: EFSA, 2005

- **Degradación Fotolítica**

La estabilidad del clorpirifos a la radiación solar se ha evaluado teniendo en cuenta su vida media en función de la latitud, tanto en agua como en aire. La EFSA (2005) reporta una vida media de disipación (DT50) de 39.9 días en condiciones de agua natural de río y bajo la luz solar (condiciones europeas); mientras que la degradación fotolítica en aire alcanza una vida media de 1 – 2.6 días y en 1.4 horas puede experimentar degradación por oxidación fotoquímica (EFSA, 2005). Por su parte, la Base de Datos de Sustancias Peligrosas HSDB reporta una vida media del clorpirifos a la fotólisis en aire de 4.2 horas (HSDB, 2012).

Degradación Biótica

Diversos microorganismos del suelo utilizan como fuente de nutrientes y energía la materia orgánica. El carbono orgánico es procedente de gran cantidad de compuestos, entre estos los plaguicidas, que se acumulan en el suelo y son susceptibles de ser transformados por la actividad biológica; es decir, que sufren un proceso de degradación y descomposición por convertirse en su principal fuente de carbono. Este fenómeno está influenciado por la temperatura, humedad, contenido de materia orgánica, pH, y nutrientes, condiciones óptimas para el desarrollo de los microorganismos del suelo. (CICOPLAFEST, 1991).

La ruta de degradación del clorpirifos en el suelo (compuesto activo del insecticida químico Lorsban), referenciado por Racke et al., 1996, muestra que, en primer lugar, se da la formación del metabolito 3, 5, 6 tricloro-2-piridinol (TPC) por hidrólisis o fotólisis, una posterior degradación por los microorganismos, la mineralización y, por último, la incorporación del carbono al contenido de materia orgánica del suelo. De la misma manera, Murray et al., (2001) establecen que las principales vías de degradación del clorpirifos ocurren por reacciones abióticas como la hidrólisis, y que dependen de las condiciones del suelo que favorecen esta degradación; seguida de la acción de los microorganismos.

2.5.2 Factores que afectan el transporte del Insecticida Químico Lorsban:

La transformación del insecticida químico Lorsban (clorpirifos) puede darse tanto por factores tanto abióticos como bióticos. Así mismo, puede moverse a través del medio poroso y alcanzar fuentes subterráneas o no, dependiendo de las condiciones del suelo. Sin embargo, los mecanismos de transporte o degradación del clorpirifos puede limitarse por aspectos relacionados con su afinidad al suelo o los seres vivos, es decir, por su persistencia o bioacumulación.

Persistencia

Se ha demostrado que el clorpirifos (compuesto activo del insecticida químico Lorsban) presenta una vida media más larga en suelos orgánicos con respecto a suelos minerales, tendiendo a permanecer en la fracción coloidal. Los procesos de degradación abiótica como la hidrólisis son más lentos en aguas con minerales arcillosos, sedimentos humanos, materia orgánica disuelta y sedimentos en suspensión (Gebremariam et al 2012). Otros factores que limitan la degradación del clorpirifos y los hace permanecer en el suelo o agua son el pH, la humedad y la temperatura, así como las tasas y formas de aplicación del insecticida al suelo. Algunos casos de estudio reportan que las tasas de degradación del compuesto se duplicaban a medida que aumentaba la temperatura en 10°C (Racke et al 1994); la descomposición hidrolítica se da más rápido en condiciones alcalinas (Baskaran et al 1999); y la sombra repercute en la disminución de la fotodegradación del clorpirifos (Chai et al 2008).

El insecticida químico Lorsban por lo tanto, resulta menos persistente en zonas tropicales, evidenciándose una degradación microbiana alta, fotólisis y volatilización; y más

persistente en suelos con condiciones templadas. No obstante, su persistencia resulta más alta en la medida en que la temperatura, el pH y la luz disminuye, así como con el incremento del material orgánico del suelo.

Bioacumulación

Existen pocos estudios relacionados con la bioacumulación del clorpirifos, sin embargo, se ha reportado que existe un grado importante de bioacumulación de este compuesto en gran variedad de especies. Los valores de Log K_{ow} para clorpirifos varían de 4.7 a 5.11, que corresponden a condiciones que exceden el umbral fijado por la Convención de Estocolmo y superando los valores registrados para el Lindano, un Contaminante Orgánico Persistente (EFSA 2005; PPDB 2012; Gebremariam et al 2012; Watss, 2012)

2.6 Estado del Arte

Castillo et al., (2003) estudiaron la movilidad del Furadán (Carbofuran) a través de columnas de suelo sin alterar en tubos de PVC de 46 mm de diámetro interno y 200 mm de largo. Los autores sugieren que las diferencias en el contenido de la materia orgánica en el suelo analizado influyen en la estabilidad y movilidad de este pesticida, y que el movimiento hacia abajo de los compuestos orgánicos a través del perfil del suelo está generalmente retardado por las propiedades de adsorción de los constituyentes del mismo.

Torres et al., (2009) evaluaron el efecto Carbofuran sobre la respiración basal de un suelo en diferentes períodos de incubación. Se encontró que en los primeros siete días este insecticida generó menos actividad biológica. Para los autores la descomposición del Carbofuran depende del pH del suelo. La degradación ocurre principalmente por hidrólisis en condiciones alcalinas, pero en condiciones ácidas, la degradación es principalmente microbiana. Se señala que la tasa de degradación de los plaguicidas es más rápida cuando las dosis aplicadas son bajas.

Serrano et al (2012), analizaron tiempos de viaje para aceites de carros, simulando accidentes de derrames en columnas de suelo de naturaleza arenosa, encontrando que a medida que el tamaño del grano disminuye, también es menor la capacidad de los fluidos para desplazarse en el medio poroso, y por ello resulta mayor el tiempo de recorrido. Así mismo, se estudian los cambios asociados a la disminución de aptitudes del suelo para uso agrícola y la pérdida de oportunidad de uso del suelo para otras aplicaciones industriales o comerciales, producto de la contaminación por compuestos derivados del petróleo.

Mojica & Guerrero, (2013) analizaron el movimiento de plaguicidas hacia la cuenca del lago de Tota (Boyacá, Colombia) a partir de muestras de agua y sólidos sedimentables durante 7 meses en algunos canales que recorren la zona y desembocan en el lago. Finalmente, los autores utilizaron el “Pesticide Impact Rating Index” (PIRI) para evaluar el riesgo potencial de movilidad de los plaguicidas.

Reyna et al., (2014), desarrollaron la modelación matemática del movimiento del flujo y transporte de un plaguicida (atrazina) en la zona no saturada de un suelo procedente del

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en la localidad de Manfredi (Córdoba, Argentina). Para efecto de las modelaciones computacionales utilizaron el programa HYDRUS.

Martínez et al., (2015) estudiaron el movimiento de oxadixyl a través de columnas de suelo (30 cm de longitud y 14 cm de diámetro) en condiciones de laboratorio, utilizando un suelo de cultivo de cebolla del lago de Tota (Boyacá, Colombia). Los ensayos se realizaron a partir de la inyección de solución de CaCl_2 0,01 M, que contenía un trazador (bromuro) y oxadixyl en la superficie del suelo de la columna, y lluvia simulada. La curva experimental de elución de oxadixyl se analizó utilizando el programa Stanmod (problema inverso) para obtener los parámetros de transporte. Bajo estas condiciones experimentales, oxadixyl resultó móvil en este suelo y presenta un riesgo potencial de contaminación de las aguas subterráneas.

Posteriormente, Dan et al., (2016) estudiaron la relación entre las propiedades fisicoquímicas e hidráulicas del suelo y las características de avance de un trazador (titrio), en seis campos agrícolas de Dinamarca. Todos los experimentos se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones iniciales a escala de laboratorio. Los resultados mostraron que el contenido de partículas finas (arcillas y limos) estaba fuertemente correlacionado con la estructura funcional del suelo y las curvas de avance del trazador (BTCs), mientras que el contenido de carbono orgánico parecía menos importante para la forma de la BTC.

Quinchía, Gómez, Palencia & Giraldo, (2006). Se analizaron los principales factores que afectan la movilidad y adsorción del insecticida químico Lorsban 4EC en suelos del oriente Antioqueño sometido a aplicaciones de este compuesto. Se encontró que los altos contenidos de materia orgánica y una media a alta capacidad de intercambio catiónico, facilitan la adsorción del plaguicida en su fracción coloidal. Así mismo, se corroboró que la textura franco-arenosa del suelo permite una buena aireación favoreciendo los procesos de volatilización y degradación. No obstante, según la EPA (2004), las características del Chlorpyrifos reportan como máximo un 10% de volatilización y baja solubilidad en agua, lo que indicaría una baja probabilidad de lixiviación.

Rodríguez et al., 2006, evaluaron la adsorción del clorpirifos mediante la técnica experimental llamada *batch*, para la obtención de isotermas de adsorción. Según Giles (1960), las isotermas de adsorción de clorpirifos por suelos son de tipo S (curvatura convexa inicial) aproximándose a una forma C, indicando una baja afinidad del adsorbente por el adsorbato a bajas concentraciones de equilibrio, y aumentando la adsorción a mayores concentraciones de equilibrio. Las isotermas se ajustaron a la ecuación de adsorción de Freundlich con un coeficiente de correlación de $r^2=0,91$. Así mismo, calculó un coeficiente de distribución K_d , definido a partir de la relación C_s/C_e siendo C_s la cantidad de insecticida adsorbido en el suelo para una concentración de equilibrio dada, y C_e , la concentración de equilibrio seleccionada, en este caso $0,4 \mu\text{g mL}^{-1}$. Uno de los suelos evaluados presentaba textura franca arcillo arenosa, bajo contenido de materia orgánica (1,9%) y un coeficiente de distribución o partición $K_d=130$ (mL/g). Los resultados obtenidos indican que la arcilla tiene importante capacidad para la adsorción del insecticida en suelos con bajo contenido de materia orgánica, a pesar de que las moléculas de agua confieren un carácter hidrofílico a la superficie de estos

minerales impidiendo la adsorción de compuestos orgánicos hidrofóbicos como lo es el clorpirifos.

Yang et al., 2010 encontraron que, en suelos minerales con aportes de materia orgánica, la persistencia del clorpirifos aumentó significativamente, alcanzado vidas medias desde 21.3 días a 55.5 días y a 158+10.1 días en un suelo esterilizado.

Finalmente, cabe destacar un antecedente en el Municipio de Agustín Codazzi en el Cesar, donde a mediados de los 70 y con 60 mil hectáreas de campo forradas de blanco, Codazzi se convirtió en el principal productor de algodón del país. Pero llegó la crisis y todo el dinamismo económico se vino a pique, debido principalmente, a problemáticas relacionadas con el fenómeno de El Niño, la apertura de la economía, el recrudecimiento de la violencia y la aparición de cultivos ilegales a pocos kilómetros de allí. El proceso empleado hasta los años 90, correspondía a una agricultura extensiva, determinada por la utilización indiscriminada de insumos químicos para el desarrollo de los monocultivos. Esto provocó la degradación del suelo y la pérdida de miles de hectáreas ahora infértiles, además de las consecuencias que se han desarrollado a causa también, de los agroquímicos que fueron enterrados. Como consecuencia de esto, la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR) ha realizado estudios que demuestran la presencia de gran cantidad de pesticidas, y a los que se les atribuye la responsabilidad de los casos de cáncer y otras enfermedades presentadas en la región, por infraestructura construida sobre estos suelos y en áreas aledañas (CORPOCESAR, 1997).

3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

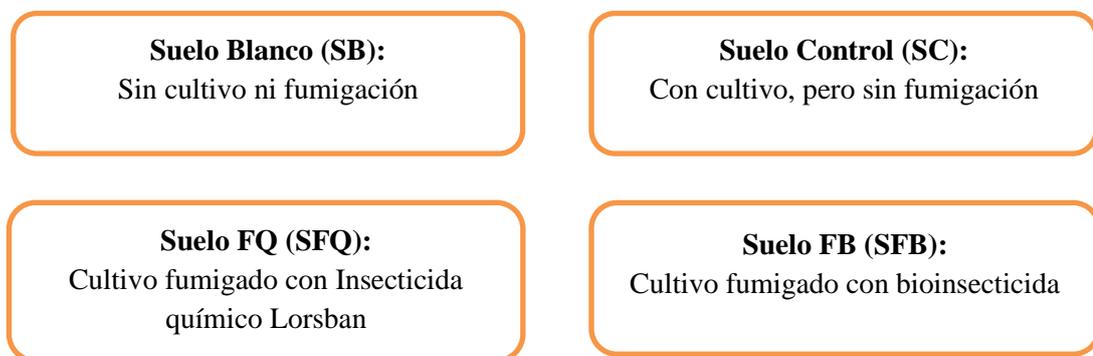
Con el fin de realizar la modelación numérica de un insecticida químico y un bioinsecticida, y evaluar su efecto sobre las propiedades fisicoquímicas de suelos cultivados con *Ananás comosus* (Piña) en el municipio de Lebrija, Santander, se llevó a cabo la metodología que se menciona a continuación.

Los análisis fisicoquímicos de los suelos objeto de estudio se desarrollaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, y en el Laboratorio de Estudios Ambientales (para las variables de carbono orgánico total, nitrógeno total y fósforo total). Los ensayos de campo se llevaron a cabo en Granjas de Bellavista en Lebrija – Santander, donde se desarrollaron los cultivos de piña para fines investigativos.

3.1 Toma de muestras y caracterización del suelo

El área de estudio localizado en las Granjas de Bellavista del municipio de Lebrija, Santander, fue dividido en cuatro áreas (cuadrantes de 6m x 1.5m) separados entre sí 1 metro de distancia. Cada una fue sometida a una condición experimental diferente (Figura 8).

Figura 8. Condiciones experimentales



Fuente: Autora

Las cuatro áreas experimentales estuvieron durante el tiempo de investigación bajo las mismas condiciones de riego y fertilización con triple quince, de la forma en que tradicionalmente se maneja el cultivo de piña por los agricultores de la región; así como la fumigación en las áreas correspondientes.

La frecuencia de aplicación del insecticida químico fue de 30 días, y del bioinsecticida de 15 días, bajo una dosificación aproximada de 5.0 (L/ha), proporción que supera la dosis recomendada (2 L/ha). Este proceso se llevaba a cabo en horas de la noche debido a que los compuestos utilizados son fotosensibles y se pueden degradar bajo la acción de la luz solar. Así mismo, se debe evitar condiciones climáticas de lluvia, temperaturas altas y fuertes vientos.

Se tomaron 5 muestras de suelo durante 8 meses de experimentación mediante muestreos al azar, estipulados de la siguiente manera:

- Muestreo 1 (M1): muestreo inicial suelos SB, SC, SFQ y SFB (febrero 9)
- Muestreo 2 (M2): muestreo 1 día después de la fumigación suelos SFQ y SFB (febrero 10)
- Muestreo 3 (M3): muestreo 1 mes de experimentación suelos SB, SC, SFQ y SFB (marzo 9)
- Muestreo 4 (M4): muestreo 1 mes y 1 día de experimentación suelos SFQ y SFB (marzo 10)
- Muestreo 5 (M5): muestreo 8 meses de experimentación (octubre 10)

Las muestras se transportaban hasta el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, donde se secaron al aire, se tamizaron y se almacenaron hasta el momento de su análisis. En la tabla 6 se reportan los parámetros fisicoquímicos analizados y los métodos aplicados para su determinación.

Tabla 6. Parámetros y métodos de análisis del suelo objeto de estudio.

Parámetro fisicoquímico	Método
pH	*NTC 5264
Conductividad Eléctrica	*NTC 5596
Textura	**ATSM WK38106 (Bouyoucos, 1962) *NTC 1522 (Granulometría)
Capacidad de campo (Humedad gravimétrica)	*NTC 947-1
Densidad aparente	*NTC 237
Densidad real y contenido de humedad	**ASTM 2216
Permeabilidad e Infiltración	**ASTM D2434-68 / ASTM D3385-09
Materia Orgánica	***INVE – 121-07
Humedad volumétrica	Sonda
Capacidad de Intercambio Catiónico	*NTC5258
Fosforo total	****SM 4500-P-B,E
Nitrógeno total	****SM 4500
Granulometría	**ASTM C 136
Nitrógeno orgánico	****SM 4500 B

* NTC – Normas Técnicas Colombianas ** ASTM – American Society of Testing Materials ***IVNE – Instituto Nacional de Vías ****SM - Standard methods

Fuente: Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), 2014.

3.2 Estimación de parámetros de transporte para modelación

Para la modelación de los insecticidas se utilizaron las ecuaciones de transporte aplicadas a medios porosos mediante el modelo numérico HYDRUS, usado ampliamente para simular el flujo de agua y el transporte de solutos en suelos y aguas subterráneas con saturación variable. Los modelos en HYDRUS se pueden usar tanto para problemas directos cuando se conocen las condiciones iniciales y de contorno para todos los procesos implicados y los parámetros correspondientes del modelo, como también para problemas inversos cuando algunos de los parámetros deben calibrarse o estimarse a partir de los datos observados (Simunek, *et al.*, 2012).

La estimación de los parámetros de transporte se realizó a través de pruebas en el laboratorio y de campo a partir de la determinación de propiedades fisicoquímicas aplicando los métodos estándar, así como a partir de datos evidenciados en la literatura frente al comportamiento de los insecticidas en el medio. Las pruebas de conductividad hidráulica y difusión se realizaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, mediante el montaje que se muestra en las figuras 9, 10 y 11.

Figura 9. Montaje para determinación de la velocidad lineal media del flujo a través de un medio poroso



Fuente: autora

La prueba realizada mediante el montaje que se muestra en la figura 9 permite determinar la velocidad observada del flujo a través de un tubo de PVC que contiene suelo procedente del área de estudio sin disturbar. A partir de este dato se puede calcular la velocidad lineal media, necesaria para determinar otros parámetros de transporte de fluidos en un medio poroso, mediante la siguiente expresión

$$velocidad\ observada = \frac{velocidad\ lineal\ media}{coeficiente}$$

El coeficiente depende de la tortuosidad del medio poroso y puede variar aproximadamente entre 1,0 y 1,18 en arenas (Freeze & Cherry, 1979).

Por otra parte, se realizaron pruebas de difusión con el insecticida químico Lorsban y el bioinsecticida a diferentes concentraciones, para demostrar su movilidad a través de una membrana semipermeable dada por gradientes de concentración.

Figura 10. Pruebas de difusión del insecticida químico Lorsban a diferentes concentraciones.



Fuente: autora

Figura 11. Pruebas de difusión del insecticida biológico a diferentes concentraciones.



Fuente: autora

Por otra parte, los datos de precipitación media diaria de la estación meteorológica más cercana fueron tomados de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. El cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ET_o) se desarrolló mediante de la fórmula de Hargreaves a partir de la temperatura y la radiación solar (Hargreaves y Samani, 1985), cuya expresión general es:

$$ET_o = 0,0135 (t_{med} + 17,78)R_s,$$

donde

ET_o	evapotranspiración potencial diaria, mm/día
t_{med}	temperatura media, °C
R_s	radiación solar incidente, convertida en mm/día

Los valores encontrados por la fórmula de Hargreaves fueron altos, entonces se recurrió a la fórmula de FAO Penman-Monteith para calcular una mejor evapotranspiración de referencia, como se presentada a continuación:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)},$$

donde

ET_o	evapotranspiración de referencia (mm día-1)
R_n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día-1)
R_a	radiación extraterrestre (mm día-1)
G	flujo del calor de suelo (MJ m ⁻² día-1)
T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
u_2	velocidad del viento a 2 m de altura (m s ⁻¹)
e_s	presión de vapor de saturación (kPa)
e_a	presión real de vapor (kPa)
$e_s - e_a$	déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C ⁻¹)
γ	constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹)

3.3 Comparación de los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los suelos tratados con el insecticida químico y el bioinsecticida.

La comparación de los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los suelos tratados con el insecticida químico y el bioinsecticida en las cuatro áreas de estudio in situ, se realizó bajo los métodos mostrados en la Tabla 6, en el laboratorio de suelos de la

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga a partir de 5 muestreos, como se describe en el capítulo 3.1 del presente documento.

Así mismo, se realizó un análisis comparativo entre la variación de las propiedades fisicoquímicas y el riesgo ambiental teniendo en cuenta las condiciones de transporte y movimiento de los insecticidas en el suelo evaluado.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Caracterización inicial del suelo

Los resultados de la caracterización de los suelos sometidos a las condiciones experimentales en las Granjas de Bellavista en el municipio de Lebrija, Santander, se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de caracterización inicial de los suelos

Tipo de Análisis	Parámetro		Valor			
			SB	SC	SFB	SFQ
Físicos	Textura (Bouyoucos)	Arcilla (%)	26,0	22,4	26,0	25,15
		Limo (%)	5,3	8,9	5,9	8,19
		Arena (%)	68,7	68,7	68,1	66,67
		Clasificación	Franco arcilloso – arenoso			
	Conductividad hidráulica (m/día)					
	Densidad aparente (g/ml)		1,6	1,6	1,6	1,6
	Porosidad (%)		18,7	25,6	15,87	27,9
	Densidad real (g/ml)		2,0	2,2	2,0	2,22
	Pérdida de Humedad Gravimétrica (%)	día 1	2,4	3,7	7,1	7
		día 2	2,0	2,9	5,3	4,3
		día 3	1,4	2,4	3,9	3,6
		día 4	1,1	0,9	1,7	1,7
	Químicos	pH		4,7	4,2	4,5
Aluminio Intercambiable (meq/100g)		3,3	3,2	3,5	3,3	
Acidez Intercambiable (meq/100g)		3,5	3,1	3,9	3,9	
Capacidad de Intercambio Catiónico [meq / 100 g]		12,4	9,1	7,7	15,9	

Carbono orgánico total (%)	0,72	0,61	0,96	0,98
Materia Orgánica (%)	1,7	2,5	2,3	2,2
Fosforo total (mg PO ₄ /kg)	120	104	179	123
Nitrógeno total (mg NTK/kg)	448	476	420	448
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0,61	0,52	0,51	0,5

Fuente: Autora

Las propiedades fisicoquímicas iniciales de los suelos de interés indican condiciones ácidas con bajos valores de pH (4,25 a 4,65) y un nivel de aluminio intercambiable mayor a 1 ppm, lo cual señala que se puede ejercer la toxicidad de este ion en el suelo. La textura inicial de estos suelos es Franco–arcillo-arenoso con una infiltración entre 175,85 y 397,57 cm/h y la densidad aparente de 1,64 g/cm³, el cual se ajusta al valor reportado como típico para este tipo de suelo agrícola. Los bajos valores de carbono orgánico total (0,61% a 0,98%) y de la materia orgánica presente en un rango de 1,7 % a 2,5 %, junto con los bajos valores de nitrógeno total (420 a 476 mg NKT/Kg) señalan la necesidad de una fertilización constante de estos suelos.

4.2 Estimación de parámetros de transporte para modelación

Los parámetros de transporte requeridos para la modelación fueron determinados a partir de pruebas realizadas en campo, mediante ensayos de laboratorio, y a partir de datos reportados en la literatura, tal como se presenta en la Tabla 8. Los resultados de las pruebas y demás cálculos se presentan en los Anexos (Anexo X).

Las pruebas de difusión tanto para el insecticida químico como el bioinsecticida demostraron que este mecanismo de transporte puede llegar a despreciarse, dado que no se presentaron variaciones en la concentración de las sustancias a partir de su transporte por la membrana semipermeable.

La modelación de los insecticidas en el suelo objeto de estudio, supone la distribución a través de un perfil de suelo de 20 cm, distancia en la que se desarrollan las raíces de los cultivos de Piña.

Tabla 8. Parámetros de transporte para modelación del suelo al inicio del tratamiento experimental

Parámetros de transporte para modelación (Suelo inicial)	
Parámetro	Valor
Velocidad observada (laboratorio)	0,00013859 m/s

Coeficiente (tortuosidad)	1,18 (Freeze & Cherry, 1979)
Velocidad lineal media (v)	0,000163536 m/s
Aceleración de la gravedad (g)	9,8 m/s ²
viscosidad cinemática	0,03 m ² /s (Insecticida químico)
d_{10} = diámetro 10%	0,000074 metros
Densidad aparente	1,64 (g/cm ³)
Densidad real	2,0 (g/cm ³)
Porosidad eficaz (me)	18 %
Conductividad hidráulica (K) a partir de la granulometría	2,588688342 cm/d
Gradiente hidraulico*(i)	9824,72452
Velocidad de Darcy	0,002943652 m/s
Coeficiente de difusión (D*)	Despreciable
Dispersión hidrodinámica longitudinal (DL= $\alpha L * v + D^*$)	0,000135735 m/s
Dispersividad dinámica longitudinal: $\alpha L = 0,83$ (Log (Longitud del fluido recorrida)) ^{2,414}	0,83
Θ_r Contenido de agua residual	0,093
Θ_s Contenido de agua saturada	0,177
Coeficiente de distribución (Kd)	130 mL/g

Bajo las condiciones del suelo al inicio de la investigación, y teniendo en cuenta que los insecticidas presentan condiciones similares en relación con los mecanismos de transporte en el suelo, el modelamiento a través de Hydrus-1D indica que la concentración de los contaminantes se hace despreciable en los primeros 2 cm de profundidad aproximadamente, y se acumula en la superficie. Lo anterior, relacionado con la capacidad que tiene el suelo de retener contaminantes orgánicos.

Figura 12. Cambio de la concentración en el perfil del suelo objeto de estudio

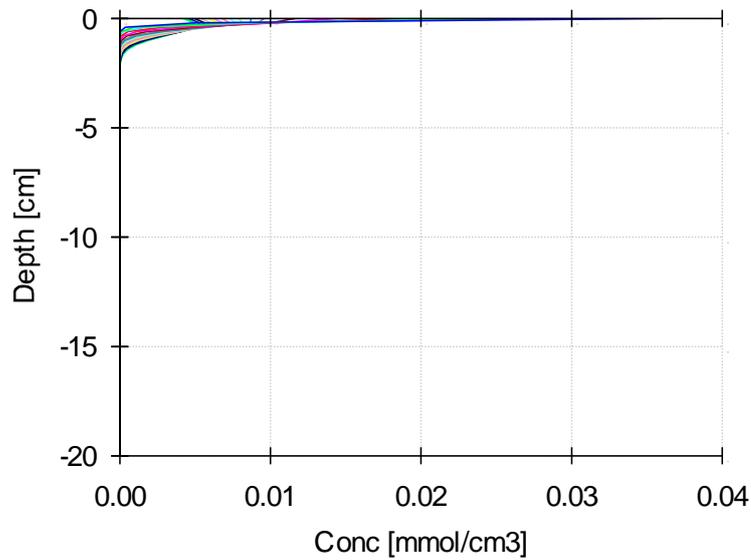
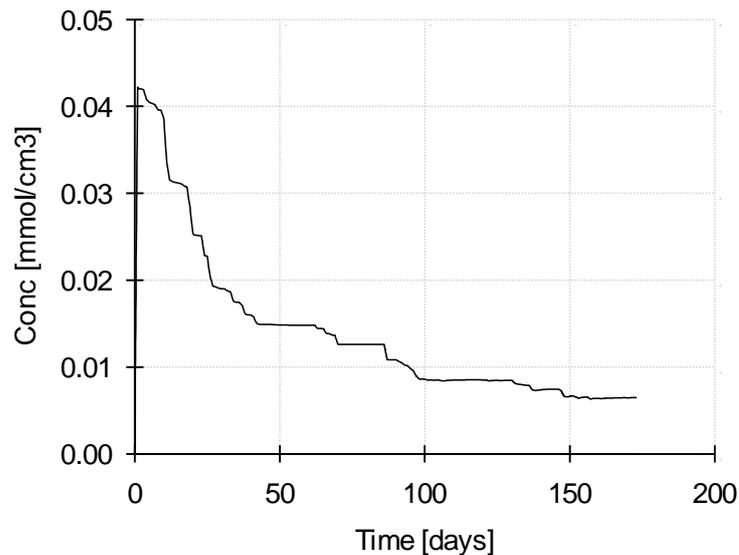


Figura 13. Cambio de la concentración en el tiempo del suelo objeto de estudio



4.3 Comparación de los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los suelos tratados con el insecticida químico y el bioinsecticida.

Se realizaron mediciones de las variables fisicoquímicas de los suelos en estudio durante 8 meses, mediante la frecuencia descrita en el capítulo 3.1; cada parámetro fue analizado por triplicado en cada uno de los 5 muestreos desarrollados (los análisis estadísticos de los cambios presentados en el suelo se presentan en el Anexo B). Los resultados de la caracterización de cada una de las cuatro unidades experimentales evaluadas se muestran en las tablas 9, 10, 11 y 12.

Tabla 9. Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo blanco SB

Parámetro		Valor		
		M1	M3	M5
Textura (Bouyoucos)	Arcilla (%)	26	22	20,05
	Limo (%)	5,3	10,61	9,28
	Arena (%)	68,7	67,39	70,67
	Clasificación	Franco arcilloso - arenoso	Franco arcilloso - arenoso	Franco arcilloso - arenoso
Infiltración (H ₂ O cm/h)		268,9	239,3	153,9
Densidad aparente (g/ml)		1,64	1,29	1,43
Porosidad (%)		18,7	36,45	38,22
Densidad real (g/ml)		2,0	2,0	2,3
Pérdida de Humedad Gravimétrica (%)	día 1	2,4	2,4	1,8
	día 2	2	2,1	1,2
	día 3	1,4	1,8	0,8
	día 4	1,1	1,1	0,6
pH		4,7	4,6	4,4
Aluminio Intercambiable (meq/100g)		3,5	3,3	2,8
Acidez Intercambiable (meq/100g)		3,3	3,3	2,8
Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100g)		12,4	8,1	7,8
Carbono orgánico total (%)		0,72	0,6	
Materia Orgánica (%)		1,7	2,2	1,7
Fosforo total (mg PO ₄ /kg)		120	141	
Nitrógeno total (mg NTK/kg)		448	504	
Conductividad Eléctrica (dS/m)		0,61	0,71	1,17

En el transcurso de tiempo de experimentación se observó una leve disminución del porcentaje de arcilla y, por ende, aumento del porcentaje de limo en el suelo SB. Sin embargo, la textura de este suelo se mantiene como franco arcilloso-arenosa. Así mismo, pierde capacidad de retención de agua y su densidad aparente disminuye, dada la pérdida de suelo por erosión, debido a que en esta condición experimenta el suelo se encuentra desprovisto de cobertura vegetal.

Tabla 10. Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo control SC

Parámetro		Valor		
		M1	M3	M5
Textura (Bouyoucos)	Arcilla (%)	22,43	20,67	18,05
	Limo (%)	8,85	5,33	5,28
	Arena (%)	68,72	74,0	76,67
	Clasificación	Franco arcilloso - arenoso	Franco arcilloso - arenoso	Franco-arenoso
Infiltración (H ₂ O cm/h)		365.8	47.5	115.1
Densidad aparente (g/ml)		1,64	1,29	1,35
Porosidad (%)		25,60	33.16	43,75
Densidad real (g/ml)		2,2	1,9	2,2
Pérdida de Humedad Gravimétrica (%)	día 1	3,7	4,1	2,9
	día 2	2,9	2,2	2
	día 3	2,4	1,7	1,8
	día 4	0,9	1,3	1,3
pH		4,2	3,9	3,8
Aluminio Intercambiable (meq/100g)		3,1	3,1	2,6
Acidez Intercambiable (meq/100g)		3,2	3,1	3,1
Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100g)		9,1	6,8	8,8
Carbono orgánico total (%)		0,61	0,74	x
Materia Orgánica (%)		2,5	2,6	1,8

Fosforo total (mg PO₄/kg)	104	119	x
Nitrógeno total (mg NTK/kg)	476	532	x
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0,52	0,64	2,44

El suelo SC presentó un cambio de porcentaje de arcilla y limo más significativo comparada con el suelo SB, lo cual se manifestó en un cambio de textura de franco-arcillosa-arenosa a franco arenosa al final del proceso. Esto indica una degradación de la textura causada por el cultivo de la piña.

Por otra parte, El pH del suelo SC presentó un leve descenso de su valor a 3,8, lo cual se debe a la presencia del cultivo de la piña, favoreciendo su acidificación.

Tabla 11. Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo fumigado con el bioinsecticida SFB

Parámetro		Valor				
		M1	M2	M3	M4	M5
Textura (Bouyoucos)	Arcilla (%)	26	23,3	24	24,8	20,7
	Limo (%)	6,0	8,0	8,0	7,3	9,3
	Arena (%)	68,1	68,7	69,2	68,1	70
	Clasificación	Franco arcilloso - arenoso				
Infiltración (H₂Ocm/h)		-	-	-	-	226,74
Densidad aparente (g/ml)		1,64	-	1,29	-	1,52
Porosidad (%)		15,9	-	24,6	-	24
Densidad real (g/ml)		1,95	1,93	2,39	1,71	2,0
Pérdida de Humedad Gravimétrica (%)	día 1	7,1	4,8	4,6	4,8	4,2
	día 2	5,3	4,1	3,3	3,7	2,7
	día 3	3,9	3,7	3,4	3,6	2,3
	día 4	1,7	1,9	1,6	1,9	1,3
pH		4,5	4,4	4,3	4,4	4,5

Aluminio Intercambiable (meq/100g)	3,9	3,3	2,8	2,1	3,1
Acidez Intercambiable (meq/100g)	3,5	3,5	3,0	2,5	3,6
Capacidad de Intercambio Catiónico [meq / 100 g]	7,7	8,3	10,3	8,1	10,7
Carbono orgánico total (%)	0,96	0,73	0,74	0,73	x
Materia Orgánica (%)	2,3	2,0	2,2	2,5	2,7
Fosforo total (mg PO₄/kg)	179	140	133	136	x
Nitrógeno total (mg NTK/kg)	420	532	560	504	x
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0,51	0,42	0,60	0,96	1,82

Teniendo en cuenta que este suelo fue influenciado tanto por la fumigación con el bioinsecticida como por la siembra, se puede considerar que la fumigación contrarrestó el efecto negativo impartido por el cultivo de la piña, como mantener su textura inicial y el valor del pH, condición que no presentó el suelo SC.

Lo anterior indica que las consideraciones en el transporte del bioinsecticida en el suelo no cambian en el tiempo. Se favorece la retención de la sustancia en la fracción coloidal del suelo, y su biodegradación. No representa riesgo de transportarse a profundidades mayores.

Tabla 12. Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo fumigado con Insecticida químico Lorsban SFQ

Parámetro		Valor				
		M1	M2	M3	M4	M5
Textura (Bouyoucos)	Arcilla (%)	25,15		24,67		8,61
	Limo (%)	8,19		7,28		18,72
	Arena (%)	66,67		68,05		72,67
	Clasificación	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arenoso
Infiltración (H₂Ocm/h)		397,57		274,68		294,49
Densidad aparente (g/ml)		1,6	1,64	1,29	1,29	1,38

Porosidad (%)		25,2	18	43	38	36
Densidad real (g/ml)		2,22	2	2,3	2,1	2,15
Pérdida de Humedad Gravimétrica (%)	día 1	7		8		8,7
	día 2	4,3		6,2		6,3
	día 3	3,6		4,7		5,5
	día 4	1,7		3,7		3,7
pH		4,5	4,63	4,32	4,35	4,63
Aluminio Intercambiable (meq/100g)		1,3	1,1	1,7	1,5	2,3
Acidez Intercambiable (meq/100g)		2,9	2,7	2,4	3,2	3,1
Capacidad de Intercambio Catiónico [meq / 100 g]		15,9	16,47	16,8	16	9,53
Carbono orgánico total (%)		0,98	1,08	1,26	1,16	X
Materia Orgánica (%)		2,2	2,2	2,5	2,5	3,7
Fosforo total (mg PO₄/kg)		123	140	142	153	X
Nitrógeno total (mg NTK/kg)		448	532	532	448	X
Conductividad Eléctrica (dS/m)		0,5	0,7	0,2	1,0	1,9

El suelo fumigado por el insecticida químico Lorsban (SFQ) demuestra señales de deterioro, evidenciado por el cambio de textura de franco arcillo-arenoso a franco arenoso, pese al aumento significativo de la materia orgánica y carbono orgánico total. Sin embargo, el incremento de estos dos parámetros podría relacionarse con la acumulación del insecticida químico, asociado con el aumento de la abundancia de la población microbiana, quienes podrían utilizar los componentes del Lorsban para su desarrollo; y con el alto potencial que tiene el producto Lorsban para ser adsorbido en el suelo.

Aumento del pH del suelo disminuye la eficiencia del cultivo, generando pérdidas económicas y sobreplotación del suelo para alcanzar la productividad deseada. Valores de pH superiores a 6 causan desordenes fisiológicos en la planta, debido a la dificultad en la disponibilidad del hierro, zinc, manganeso y boro (CORPOICA, 1997).

El insecticida químico Lorsban presenta mayor posibilidad de ser degradado por condiciones abióticas, cuando la temperatura y el pH es alto. Contrario a esto, el compuesto es significativamente más persistente en el suelo cuando disminuye la temperatura, el pH y la luz, así como con el aumento de la materia orgánica.

La disminución en el porcentaje de arcillas del suelo tratado con el Lorsban, supone un efecto directo de la acumulación del insecticida, y el suministro del mismo en altas dosis por parte de los agricultores, ya que se superan las proporciones recomendadas. Lo anterior se explica, debido a que existe una interacción entre las arcillas y los plaguicidas organofosforados, la cual consiste en que éstas favorecen la naturaleza electrofílica del átomo del fósforo presente en la molécula, facilitando el ataque nucleofílico por parte de los iones hidróxido y su posterior degradación. De esta manera, el insecticida se activa por las arcillas y podría dificultar su cuantificación, lo que se deduce en la disminución de éstas (Racke et al 1996)

4.4 Comparación de los cambios en la dispersión de los contaminantes del suelo tratado con el insecticida químico Lorsban y el Bioinsecticida.

Los suelos tratados con el insecticida químico Lorsban y el Bioinsecticida presentaron alteraciones en sus propiedades fisicoquímicas. Estas condiciones afectan el transporte de los compuestos que se introducen al suelo y su dispersión en el ambiente. En las tablas 13 y 14 se destacan los parámetros utilizados para la modelación de los contaminantes en el suelo sometido durante 8 meses a las sustancias de interés.

Tabla 13. Parámetros de transporte para modelación del suelo tratado con el insecticida químico Lorsban durante 8 meses.

Parámetros de transporte para modelación (Suelo tratado con el insecticida químico)	
Parámetro	Valor
d_{10} = diámetro 10%	0,000074 metros
Densidad aparente	1,38 (g/cm ³)
Densidad real	2,15 (g/cm ³)
Porosidad eficaz (me)	35,8 %
Conductividad hidráulica (K) a partir de la granulometría	4,86194679 cm/d
Coefficiente de difusión (D*)	Despreciable
Dispersividad dinámica longitudinal: $\alpha L = 0,83$ (Log (Longitud del fluido recorrida)) ^{2,414}	0,83
Θ_r Contenido de agua residual	0,063

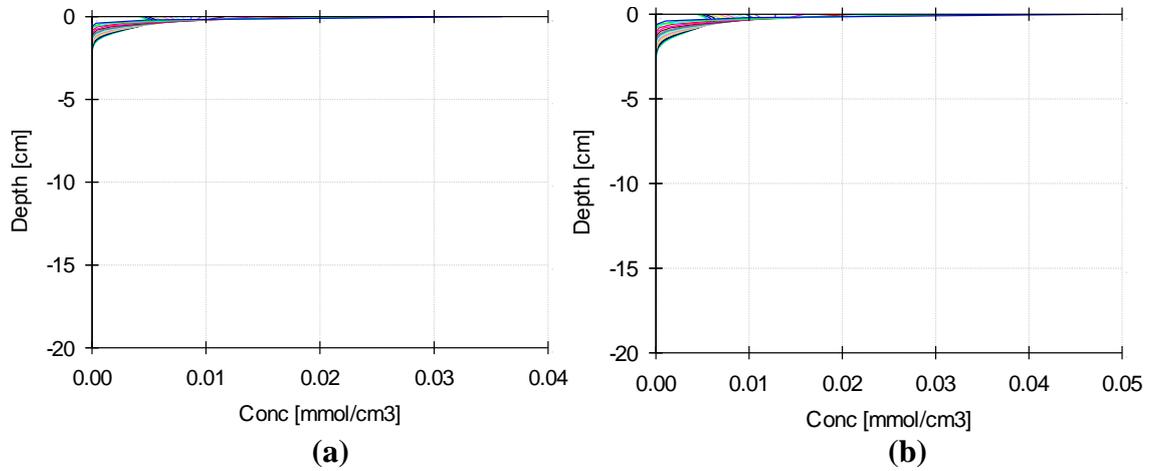
Θ_s Contenido de agua saturada	0,36
Coefficiente de distribución (Kd)	130 mL/g

Tabla 14. Parámetros de transporte para modelación del suelo tratado con el bioinsecticida durante 8 meses.

Parámetros de transporte para modelación (Suelo tratado con el Bioinsecticida)	
Parámetro	Valor
d_{10} = diámetro 10%	0,000074 metros
Densidad aparente	1,52 (g/cm ³)
Densidad real	2,0 (g/cm ³)
Porosidad eficaz (me)	24 %
Conductividad hidráulica (K) a partir de la granulometría	3,3522635 cm/d
Coefficiente de difusión (D*)	Despreciable
Dispersividad dinámica longitudinal: $\alpha L = 0,83$ (Log (Longitud del fluido recorrida)) ^{2,414}	0,83
Θ_r Contenido de agua residual	0,071
Θ_s Contenido de agua saturada	0,24
Coefficiente de distribución (Kd)	130 mL/g

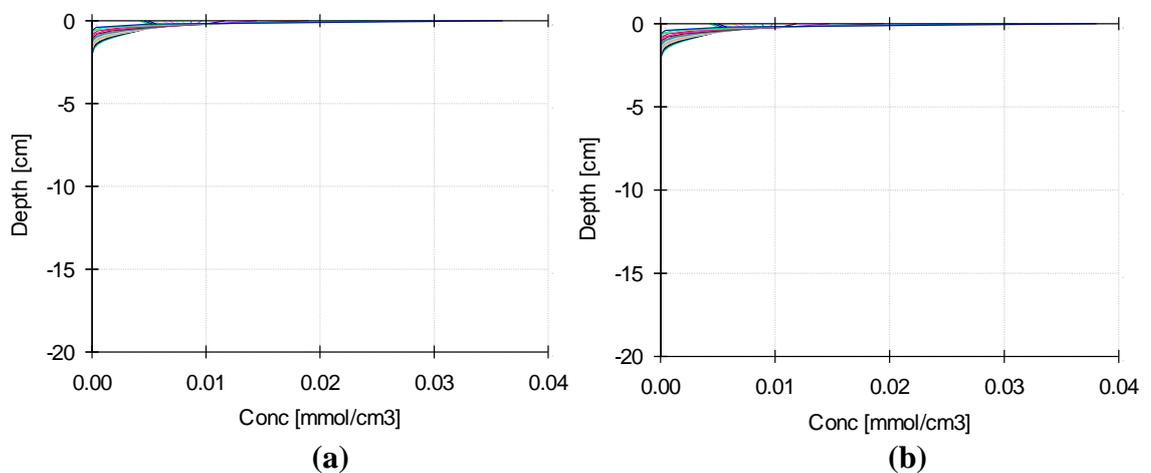
En la siguiente figura se muestra el resultado de la modelación del insecticida químico Lorsban en el suelo objeto de estudio y el cambio de su dispersión a través del perfil, luego de someterse 8 meses a este compuesto de interés.

Figura 14. Comparación en el cambio en la concentración del insecticida químico Lorsban en el perfil de suelo objeto de estudio. **(a)** Dispersión al inicio de estudio **(b)** Dispersión luego de tratar el suelo 8 meses con el insecticida químico Lorsban.



El modelo de dispersión de los contaminantes a través del Hydrus-1D, evidencia que el suelo sometido al insecticida químico Lorsban altera propiedades claves para la movilidad del compuesto en la matriz porosa, favoreciendo su dispersión debido a que se aumenta la porosidad por el aumento en el contenido de arenas; así mismo, la reducción de arcilla y la acumulación del insecticida químico en el suelo, disminuye la capacidad de ser retenido por la fracción coloidal. Según Racke et al (1996) existe una interacción entre las arcillas y los plaguicidas organofosforados, la cual consiste en que éstas favorecen la naturaleza electrofílica del átomo del fósforo presente en la molécula, facilitando el ataque nucleofílico por parte de los iones hidróxido y su posterior degradación. De esta manera, a medida que aumenta la cantidad de clorpirifos en el suelo existe menor probabilidad de que este sea activado por las arcillas y luego hidrolizado en la solución del suelo.

Figura 15. Comparación en el cambio en la concentración del Bioinsecticida en el perfil de suelo objeto de estudio. **(a)** Dispersión al inicio de estudio **(b)** Dispersión luego de tratar el suelo 8 meses con el Bioinsecticida.



Contrario a lo que sucede con el insecticida químico en el suelo, el bioinsecticida no afecta significativamente las propiedades físicas implicadas en la movilidad de las sustancias a través del suelo en estudio, lo que favorece la retención de la sustancia de origen natural para su posterior degradación (biótica y abiótica).

A partir de lo evidenciado, es posible indicar que el biosinsecticida no altera las propiedades del suelo que supongan un riesgo de dispersión de las sustancias aplicadas y la afectación de otros terrenos o fuentes hídricas cercanas, así como los cambios en los usos del suelo y pérdida de la productividad.

5. CONCLUSIONES

Las propiedades fisicoquímicas iniciales de los suelos de interés procedentes del municipio de Lebrija, Santander, indicaron condiciones ácidas con bajos valores de pH (4,25 a 4,65), típico para un suelo cultivado con *Ananas comosus* (piña). La textura resultó Franco arcillo-arenosa con una conductividad hidráulica de 2,6 cm/día y una porosidad del 18%, restringiendo medianamente los procesos de lixiviación y dispersión de fluidos en la matriz sólida. Se considera un suelo pobre por su bajo contenido de carbono orgánico total y materia orgánica, así como un valor reducido de nitrógeno total (420 a 476 mg NKT/Kg).

La dispersión de los insecticidas evaluados al inicio de la investigación evidencia que las sustancias alcanzan 2 cm de profundidad aproximadamente, y se acumula en la superficie; relacionándose con la capacidad que tiene el suelo de retener contaminantes orgánicos, debido a su contenido de arcillas y baja permeabilidad.

Los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los suelos estudiados evidencian que en el transcurso del tiempo de experimentación (8 meses), la textura del suelo control (SC) y el suelo fumigado con el insecticida químico (SFQ) cambió de Franco arcillo-arenoso a Franco arenoso, lo que incrementa la capacidad de dispersión de los compuestos en este suelo dada su mayor porosidad; mientras que el suelo fumigado con el bioinsecticida (SFB) mantuvo su estructura inicial, relacionado con la agregación del compuesto en registro de patente, lo que a su vez contribuyó al aumento del porcentaje de materia orgánica de 2,3 a 2,7%, por su posible acumulación en el suelo. Se destacan los valores de pH de los suelos de interés, los cuales oscilaron entre 3.8 y 4.7, siendo el suelo SC el que presentó la tendencia de reducción de su valor inicial, mientras que el suelo SB lo mantuvo. Considerando que el suelo SC fue sembrado con la piña y el suelo SB no, se puede atribuir la acidificación de suelo al cultivo de la piña. Los pH del suelo SFQ presentaron mayores valores, lo cual se puede asociar a la adición del insecticida, debido a que la fórmula química del producto comercial incluye emulsificantes, surfactantes y otros; por su parte el suelo SFB mantuvo el rango de pH durante el tiempo de fumigación, destacando el efecto favorable del bioinsecticida aplicado en el cultivo, manteniendo condiciones ideales para su productividad.

La modelación del transporte de los suelos cultivados con *Ananás comosus* (Piña) y tratados con el insecticida químico Lorsban, reflejan el deterioro de su estructura y aumento de la porosidad, incrementando el riesgo de dispersión de los compuestos químicos en el suelo y la contaminación de fuentes hídricas subterráneas y superficiales. Por su parte, los suelos que recibieron el bioinsecticida mantienen sus características físicas que favorecen la actividad biológica para su biodegradación, reteniendo el compuesto de origen natural en los primeros centímetros del suelo.

El pH del suelo juega un papel importante tanto en la productividad del cultivo de piña como en la persistencia del insecticida químico Lorsban. Los suelos aptos para el cultivo de piña requieren suelos en condiciones ácidas (pH entre 5.5 y 6.2), fenómeno que favorece la persistencia del insecticida. Contrario a esto, un pH alto disminuye la eficiencia del cultivo pese a que son condiciones que aumentan la degradación del

compuesto químico de interés. Por lo tanto, el suelo sometido a cultivos de piña en el municipio de Lebrija, Santander, tienen a acidificarse, parámetro que indica una mayor persistencia del insecticida químico Lorsban en el suelo.

Los cambios presentados en los suelos objeto de estudio y sometidos al insecticida químico Lorsban suponen su acumulación por el aumento del carbono orgánico total, así como la pérdida de arcilla y, por ende, la disminución de la capacidad de intercambio catiónico, lo cual puede generar a largo plazo la deficiencia de elementos esenciales en este suelo, y cambios en los usos y aptitudes de éste. Los suelos predominantemente arenosos y desprovistos de cobertura vegetal se hacen más vulnerables a los procesos de erosión, situación que limita su uso.

Los cambios en el uso del suelo representan un gran aporte al cambio climático, pues la expansión de la frontera agrícola y con ello la deforestación y acumulación de gases de efecto invernadero, son algunas de las causas que impiden la sostenibilidad ambiental desde el punto de vista del ordenamiento territorial.

El análisis de transporte de insecticidas en suelos agrícolas permite reconocer y emprender medidas de prevención de la contaminación de fuentes hídricas superficiales y/o subterráneas. Así mismo, identificar suelos sobreutilizados y su posible degradación física, química y biológica, que afectan procesos naturales.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda modelar el transporte del insecticida químico Lorsban y el bioinsecticida, a mayor profundidad, es decir, teniendo en cuenta diversas capas de suelo.

Se recomienda cuantificar la concentración de los compuestos de interés en el suelo.

Se recomienda prolongar el tratamiento de los suelos con el cultivo y los insecticidas para evidenciar cambios significativos.

Se recomienda identificar metabolitos de degradación del insecticida químico.

7. BIBLIOGRAFÍA

Arellano, G., Vergara, C. & Bello, S. (2015). Plagas entomológicas y otros artrópodos en el cultivo de la piña (*Ananas comosus* var. *comosus* (L.) Merr., Coppens & Leal) en chanchamayo y satipo, departamento de Junín, Perú. *Ecología Aplicada*, 14(2), 175-189.

Asohofrucol. Disponible en:
http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_281_Manejo%20Integrado%20del%20Cultivo%20de%20pi%C3%B1a.pdf

Atlas, R., Bartha, R. (2002). *Ecología microbiana y Microbiología ambiental*. Madrid: Edición PEARSON EDUCACIÓN, S.A. 696 p. ISBN 84-7829-039-7.

Badii, M & Varela, S. (2008). Insecticidas Organofosforados: Efectos sobre la Salud y el Ambiente. *Revista Culcyt*, Núm. 28 (5). Septiembre - octubre de 2008. ISSN: 2007-0411. Disponible en: <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/375/355>

BANACOL. (2013) *Guía de identificación y manejo integrado de plagas y enfermedades en piña*. Ed. Rodríguez M. Asistente Coordinadora Proyecto REP-Car BANACOL.

Baskaran S, Kookana RS, Naidu R. 1999. Degradation of bifenthrin, chlorpyrifos and imidacloprid in soil and bedding materials at termiticidal application rates. *Pestic Sci* 55:1222-8.

Bouyoucos (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agron. J.* 54(5) 464-465.

Bondarenko S, Gan J. 2004. Degradation and sorption of selected organophosphate and carbamate insecticides in urban stream sediments. *Environ Toxicol Chem* 23(8):1809-14.

Brock T.C.M.; Wijngaarden R.P.A., Van Geest, G.J. (2000). Ecological risk of pesticides in fresh water ecosystem. The Netherlands. Part 2: insecticides. Alterra. Green World Research.

Casanellas, P., Lopez, M., & Poch, R. (2010). *Introducción a la Edafología. Uso y Protección de Suelos*. Madrid: Mundi-Prensa. ISBN 978-84-8476-405-2.

Castillo, A., Delfino, M., Subovsky, M., Rodríguez, S., Fernández, N., Rojas, J. (2003). Movilidad de carbofuran (2,3-dihidro-2,2-dimetilbenzofuran-7- metilcarbamato) en columnas de suelo. Universidad Nacional del Nordeste. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*.

Chai L-K, Mohd-Tahir N, Hansen HCB. 2008. Dissipation of acephate, chlorpyrifos, cypermethrin and their metabolites in a humid-tropical vegetable production system. *Pest Manag Sci* 65:189096.

Comisión intersecretarial para el control del proceso y uso de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas - CICOPLAFEST (1991). Catálogo Oficial de Plaguicidas 1991. 469 pp.

Corporación Autónoma Regional del Cesar CORPOCESAR. (1997). Estudio de diagnóstico y evaluación del enterramiento de pesticidas en el municipio de Agustín Codazzi y procedimiento de descontaminación y disposición final de los mismos., Tomo 1 y 2 Valledupar, Cesar: Geosísmica y Ambiente.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - CORPOICA (1997). Curso: Actualización en el cultivo de la Piña. Programa Regional de Investigación Agrícola. C.I. La libertad. Convenio CORPOICA.SENA

Coutelieris, F; Delgado, J (2012). Transport Processes in Porous Media. 236 pp.

Dan Karup, Per Moldrup, Marcos Paradelo, SheelaKatuwal, Trine Norgaard, Mogens H. Greve, Lis W. de Jonge, Water and solutetransport in agriculturalsoilspredictedbyvolumetricclay and siltcontents. Journal of Contaminant Hydrology, Volume 192, September 2016, Pages 194-202, ISSN 0169-7722, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.08.001>

Delleur, J (1999). Elementary Groundwater Flow and Transport Processes. In: J.W. Delleur (editor). The Handbook of Groundwater Engineering. CRC Press, 969 pp.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE (2016). Principales características del cultivo de la Piña. Boletín mensual: Insumos y Factores Asociados a la Producción Agropecuaria, pág. 1. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_dic_2016.pdf>

Davinson, Ralph y Lyon, W. (1992). Plaga de Insectos Agrícolas y del Jardín: Plagas de cítricos. 1ª. ed. México, D.F: Editorial Limusa, S.A de C.V, 609 p. ISBN 968-18-4190-5.

Domenico, P; Schwartz, F (1998). Physical and chemical hydrogeology. Wiley, 502 pp.

Dow AgroSciences, (2013). Etiqueta Web Colombia Lorsban 4 EC. Tomado de: https://www.dowagro.com/content/dam/hdas/dowagro_colombia/pdfs/0901b80380988d82.pdf

Duran, F. (2003). Manual de cultivos orgánicos, alopátías y transgénicos. Santafé de Bogotá: Ediciones grupo latino Ltda. p.169

European Food Safety Authority EFSA (2005). Review report for the active substance chlorpyrifos. SANCO/3059/99 - rev. 1.5, 3 June 2005. European Food Safety Authority. http://ec.europa.eu/sanco_pesticides/public/index.cfm?event=activesubstance.selection.

Environmental Protection Agency – EPA (2004). Registration eligibility science chapter for Chlorpyrifos fate and environmental risk assessment chapter. En: www.epa.gov.

Environmental Protection Agency – EPA (2006). Reregistration Eligibility Decision for Chlorpyrifos. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C. http://www.epa.gov/oppsrrd1/REDs/factsheets/chlorpyrifos_fs.htm.

Eweis, J, *et al.* (1999). Principios de Biorrecuperación (Biorremediación). Tratamientos para la descontaminación y regeneración de suelos y aguas subterráneas mediante procesos biológicos y físico-químicos. Madrid: Edición McGraw - Hill, 284 p. ISBN 84-481-2511-8.

Fetter, C (1999). Contaminant Hydrogeology. Prentice-Hall, 2ª edición, 500 pp.

Fetter, C (2000). Applied Hydrogeology. Prentice-Hall, 4ª edición, 598 pp.

Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.

Gallo, Sandra (2004). Efectos del insecticida Chlorpyrifos sobre el crecimiento y la metamorfosis de *Smilisca phaeota* (Anura: Hylidae). Medellín, 32 p. Trabajo de grado (Bióloga). Universidad de Antioquia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Área de Biología.

Gebremariam SY, Beutel MW, Yonge DR, Flury M, Harsh JB (2012). Adsorption and desorption of chlorpyrifos to soils and sediments. *Rev Environ Contam Toxicol* 215:123-75

Gómez, Sully, & Guzmán, Jorge. (2011). Separación de flujo base en la cuenca superior del río Lebrija. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (61), 41-52. Retrieved June 18, 2019, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302011000500005&lng=en&tlng=es.

Guido, M *et al.* (1983) La Piña. Managua: Ministerio de Desarrollo Agropecuario y Reforma Agraria; IICA. Fondo Simón Bolívar, 20 p. – (IICA: Serie de publicaciones misceláneas; no. 443). ISSN 0534-5391. 5. PIÑA – CULTIVO. I. Guido, Mariza. II. Título. III. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=9n8OAQAIAAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=insecticida+lorsban+suelo+pi%C3%B1a&ots=GAfclTnycD&sig=zQp6m0t0zv2wbAsHrm3iRP7ya2c#v=onepage&q=insecticida%20lorsban%20suelo%20pi%C3%B1a&f=false>

Hazardous Substances Data Bank HSDB (2010). TOXNET, Toxicology Data Network, United States National Library of Medicine. <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/f?./temp/~CQiJad:1>.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.

Hiscock, H (2005). *Hydrogeology: Principles and practice*. Blackwell, 389 pp.

Institute for Environmental Toxicology (1997). Michigan State University. *Pesticide profiles: toxicity, environmental impact, and fate*. Lewis Publishers, 1997.

Instituto Colombiano Agropecuario – ICA (2012). Producción de piña es significativa en el país. *Revista Agro Negocios*. Agosto de 2012. Disponible en: <<https://www.ica.gov.co/getattachment/03f51f52-cb4e-445a-b36e-6759ba559a81/Produccion-de-pina-es-significativa-en-el-pais.aspx>>.

Kasenow, M. (2002). Determination of Hydraulic Conductivity From Grain Size Analysis. *Water Resources Pub.* 97 pp.

Kopytko, M., & Mujica, L. (2007). Bioinsecticida alternativa para eliminación de piojo blanco en cultivos de piña. *Universitas Científica*, 20-25.

Lopera Mesa, M., & Peñuela Mesa, G., & Domínguez Gual, M., & Mejía Zapata, G. (2005). Evaluación de la degradación del plaguicida clorpirifos en muestras de suelo utilizando el hongo *Phanerochaete chrysosporium*. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (33), 58-69.

Márquez, Sara (2001). Evaluación de algunos efectos de la contaminación por aplicación de lorsban (clorpirifos) en un suelo y un cultivo de kikuyo (*Pennisetum clandestinum* hochst ex chiov) en el norte antioqueño. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. Medellín. 2001. 143 p

Márquez, Sara (2001). Identificación de algunos productos de degradación del Chlorpyrifos. Medellín: Universidad de Antioquia.

Martínez, M., Aldana, M., & Guerrero, J.(2015). Modelación matemática del transporte de oxadixyl en suelos de cultivo de cebolla. *Revista Ambiente E Água*, 10(2), 327-337. doi:10.4136/ambi-agua.1565

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR Gobernación de Santander Fondo Nacional de Fomento Hortifrutícola - FNFH Asociación Hortifrutícola de Colombia - Asohofrucol Sociedad de Agricultores y Ganaderos del Valle del Cauca – SAG (2006). Plan Frutícola Nacional: Desarrollo de la Fruticultura en Santander. Disponible en: <http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_114_Plan%20Nal%20fr-r-santander.pdf>.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Colombia (2018). Producción de piña llegaría a más 950 mil toneladas en 2018, calcula MinAgricultura. Noticias agosto de 2018. Disponible en: <<https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Producci%C3%B3n-de->

pi%C3%B1a-llegar%C3%ADa-a-m%C3%A1s-950-mil-toneladas-en-2018,-calcula-MinAgricultura-.aspx>.

Mirsal, I (2008). Soil Pollution. Origin, Monitoring, & Remediation. Berlin: Springer. ISBN 978-3-540-70775-2.

Mojica, A; Guerrero, J A; (2013). Evaluación del Movimiento de Plaguicidas hacia la Cuenca del Lago de Tota, Colombia. Revista Colombiana de Química, 42() 1-27. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=309032109004>.

Murray, R. et al (2001). "Stability of chlorpyrifos for termiticidal control in six australian soils". En: Journal Food Chemistry. Vol. 49. 2001. pp. 2844-2847

National Academy of Sciences - NAS (1978). Manejo y control de plagas de insectos Vol 3. Edit. Limusa, México. Pag. 387-388.

National Marine Fisheries Service NMFS (2008). National Marine Fisheries Service Endangered Species Section 7 Consultation Biological Opinion. EPA Registration of Pesticides Containing Chlorpyrifos, Diazinon, and Malathion (November 18, 2008). National Marine Fisheries Service. http://www.nmfs.noaa.gov/pr/pdfs/pesticide_biop.pdf.

Odong, J. (2007). Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. *Journal of American Science*.

Organización Mundial de la Salud OMS. 2009. OMS Specifications and Evaluations for Public Health Pesticides. Chlorpyrifos O,O-diethyl O-3,5,6- trichloro-2-pyridyl phosphorothioate. World Health Organization, Geneva. http://www.OMS.int/OMSpes/quality/Chlorpyrifos_OMS_specs_eval_Mar_2009.pdf

Paul, E (2007). Soil microbiology, Ecology, and Biochemistry. 3 ed. Burlington: Elsevier, 532p. ISBN 978-0-12-546807-7.

Pesticide Properties Data Base PPDB. 2012. University of Hertfordshire. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/en/>.

PLM (2006). Diccionario de Especialidades Agroquímicas. Colombia. 16ª edición. Thompson PLM S.A.

Pierzynski, G; Thomas, J y Vance, G (2005). Soils and Environmental Quality. 3 ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 596p. ISBN 978-0-8493-1616-6.

Pino, N & Peñuela, G (2011), Simultaneous degradation of the pesticides methyl parathion and chlorpyrifos by an isolated bacterial consortium from a contaminated site, International Biodeterioration & Biodegradation, Volume 65, Issue 6, 2011, Pages 827-831, ISSN 0964-8305, <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.06.001>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830511001260>).

Quinchía, A; Gómez, F; Palencia, Karol & Giraldo, C (2006). EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN AISLADO BACTERIANO NATIVO COMPATIBLE CON PSEUDOMONA SP. AL INSECTICIDA LORSBAN 4 EC. Revista EIA, (5), 101-108. Retrieved January 10, 2019, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000100009&lng=en&tlng=es.

Racke, K. et al (1996). "Factors affecting the hydrolytic degradation of chlorpyrifos in soil". En: Journal Agricultural Food Chemistry. Vol. 44. 1996. pp. 1582-1592.

Reyna, T., Linares, J., Reyna, S., & Lábaque, M. (2014). Aplicación de modelos unidimensionales de flujo en suelos no saturados y transporte de herbicidas en zonas agrícolas. Revista Ambiente E Agua, 9(3), 434-444. doi:10.4136/ambi-agua.1165

Ríos, R (2005). Estudio de la Estimulación Biológica Para el Tratamiento de Residuos de Perforación Petrolera Empleando Lisímetros. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. Casa Abierta al Tiempo. México D.F

Rodríguez, S; Aatouf, N; Draoui, K; Del Hoyo Martínez, C; & Sánchez, M (2006). ADSORCIÓN DE CLOROPIRIFOS POR MINERALES DE LA ARCILLA Y SUELOS DE MARRUECOS EN SISTEMA ACUOSO. MACLA, XXVI Reunión (SEM) / XX Reunión (SEA). Tomado de: http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla6/Macla6_399.pdf.

Sánchez, J. (2010). Evaluación del riesgo ecotoxicológico derivado del uso de plaguicidas organofosforados y carbámicos empleados en la zona florícola del Estado de México, basado en el uso de bioensayos y evaluaciones rápidas de los compuestos más relevantes. Tesis de Doctorado. México. Instituto Tecnológico de Toluca. 31-33, 35, 49- 51, 57, 61.

Sánchez, J (s.f.). Ley de Darcy. Conductividad Hidráulica. Departamento de Geología Universidad Salamanca, España. Recuperado el día 15 de enero de 2019, de http://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf.

Sánchez, J (2012). Transporte de contaminantes. Departamento de Geología Universidad Salamanca, España. Recuperado el día 14 de enero de 2019, de http://hidrologia.usal.es/temas/Transporte_de_contaminantes.pdf.

Serrano, J. H. y Restrepo D (2006), Protección ambiental y producción más limpia. Parte 1 y 2. Editorial Academia.

Serrano-Guzmán, M.F., Perez Ruiz, D.D., Puppala, A., Padilla. I. (2010). CWR: alternativa para detección de NAPLs. Puente Revista Científica, 5(2), 25-35.

Stanley E. M. (2000) Environmental Chemistry. USA. Seventh edition. CRC Press LLC. Pp. 2208-216, 475-478, 745-750.

Torres, D., Rojas, P., Lopez, M., Zam, F. (2009). Efecto de los Insecticidas Methyl-Parathion, Carbofuran y lambda-cyhalotrina sobre la actividad biológica del suelo. Revista

Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora. UNELLEZ.

United States Environmental Protection Agency US EPA (2009a). Chlorpyrifos Summary Document Registration Review: Initial Docket March 2009. Docket Number: EPA-HQ-OPP-2008-0850. Case #0100. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

United States Environmental Protection Agency US EPA (2009b). Memorandum. Chlorpyrifos. Revised Human Health Assessment Scoping Document in Support of Registration Review. February 9. From Drew D, Britton W, Doherty J, Risk Assessment Branch V, Health Effects Division to Santora K, Myers M, Reregistration Branch 2, Special Review and Reregistration Division (7508P). Office of Pesticide Programs, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

United States Department of Agriculture – USDA (1994). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. 1994.

United States Department of Agriculture – USDA (2008). Soil Quality Physical Indicators: Selecting Dynamic Soil Properties to Assess Soil Function. Soil Quality Technical Note No. 10. Natural Resources Conservation Service.

United States Department of Agriculture (USDA). (2011-2014). Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42 Version 4.0 November 2004. Rebecca Burt, Editor.

Vela Correa, Gilberto, López Blanco, Jorge, & Rodríguez Gamiño, María de Lourdes. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones geográficas*, (77), 18-30. Recuperado en 20 de junio de 2019, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000100003&lng=es&tlng=es.

Meriel Watts (2012). Clorpirifos: Un posible COP a nivel global. Pesticide Action Network Norteamérica (PANNA). Traducido por Lucía Sepúlveda Ruiz, Oficina de Comunicaciones y Administración. Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas de América Latina (RAP-AL) Santiago de Chile. Tomado de: https://rap-al.org/wp-content/uploads/2017/09/Clorpirifos_Rev_-2.pdf

Weight, W. D. (2008). *Hydrogeology Field. Manual*. Mc Graw-Hill, 751 pp.

Zhou, S; Duan C; Fu, H; Chen, Y; Wang, X; Yu Z (2007). Toxicity assessment for chlorpyrifos-contaminated soil with three different earthworm test methods, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 19, Issue 7, 2007, Pages 854-858, ISSN 1001-0742, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60142-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60142-9). (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074207601429>).

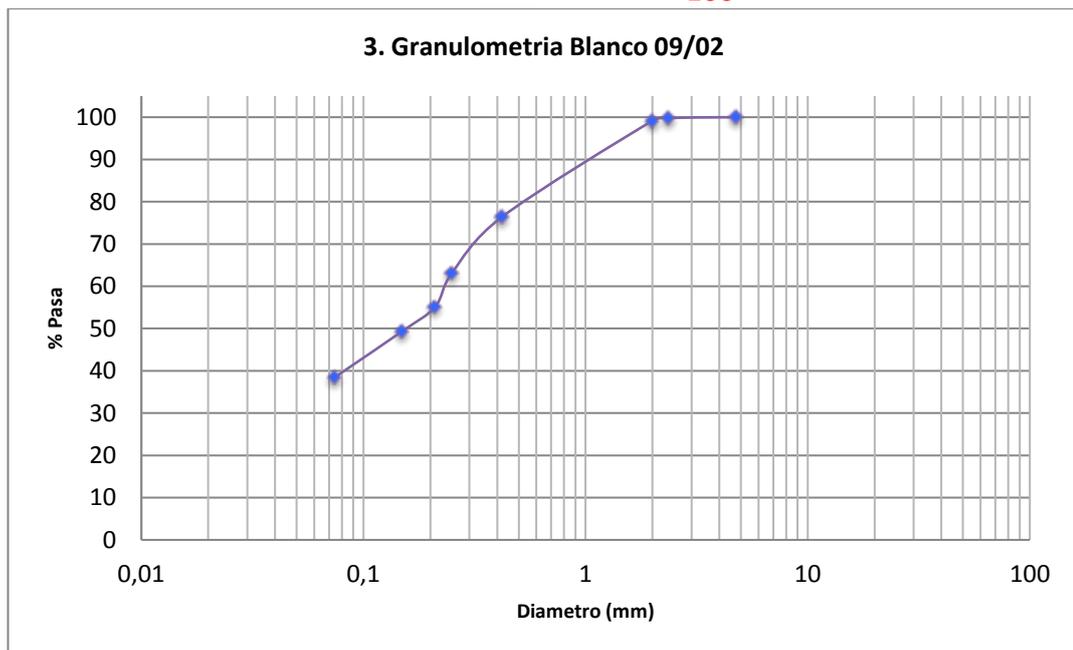
ANEXOS

Anexo A. Resultados caracterización fisicoquímica de los suelos objeto de estudio

- Granulometría suelo inicial

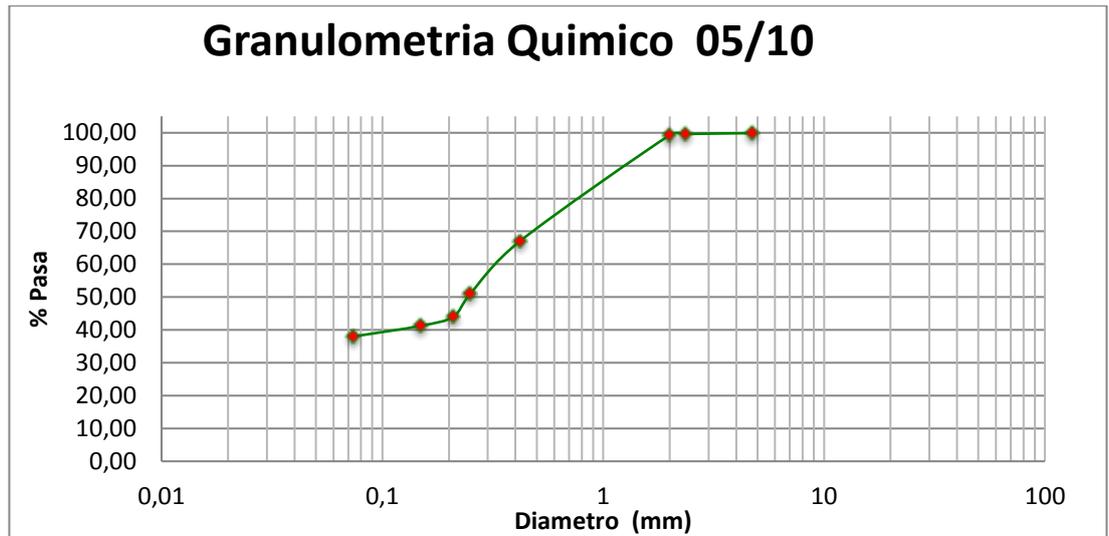
3 MUESTRA

PESO MUESTRA (g)		500						
PESO MUESTRA LAVADA POR TAMIZ N° 200 (g)		310		PESO				
FINOS		190		Retenido			Pasa (%)	
# tamiz	Diametro (mm)	Peso Tamiz	Peso Tamiz +Muestra	Parcial (g)	Parcial (%)	100		
4	4,75	497,9	497,9	0	0	100	D10	0,074
8	2,36	403,7	404,6	0,9	0,18	99,82	D30	0,074
10	2	431,3	434,6	3,3	0,66	99,16	D60	0,24
40	0,42	334,6	448,4	113,8	22,76	76,4	CU	3,17618931
60	0,25	321,2	387,6	66,4	13,28	63,12	CC	0,31484269
80	0,21	309,6	349,6	40	8	55,12		
100	0,149	302,5	331,5	29	5,8	49,32	GRAVAS	0
200	0,074	293,8	348,3	54,5	10,9	38,42	ARENAS	61,58
Fondo	..	240	242,1	192,1	38,42	0	FINOS	38,42
				500	100			



- Granulometría suelo tratado con insecticida químico Lorban por 8 meses

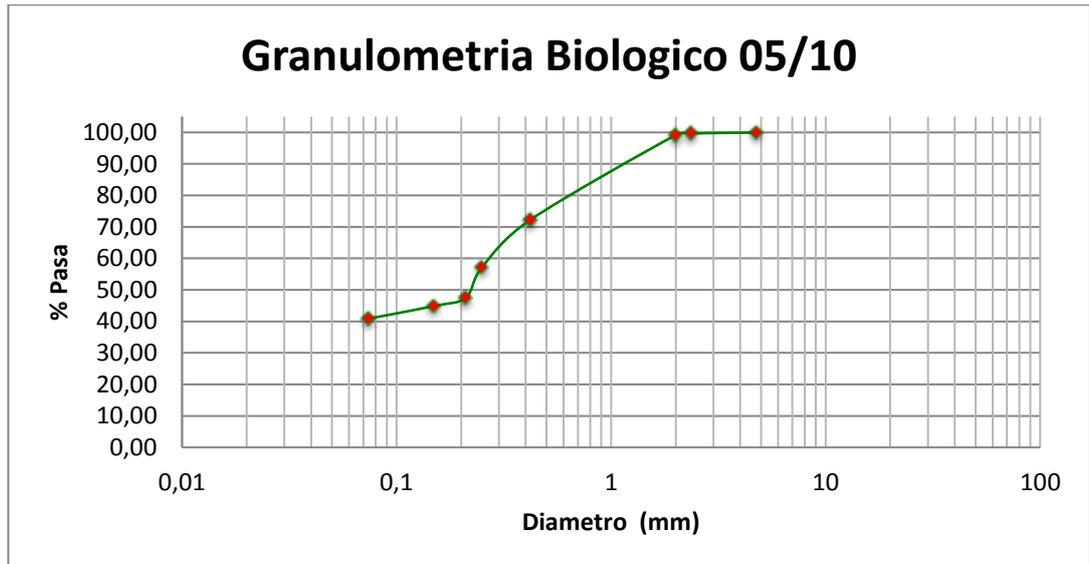
# tamiz	Diametro (mm)	% Pasa	D10	D30	D60	CU	CC
			0,074				
4	4,75	99,9		0,074			
8	2,36	99,64			0,311837241		
10	2	99,30666667				4,214016765	
40	0,42	67,03333333					0,237953807
60	0,25	50,98					
80	0,21	44,06	GRAVAS				
100	0,149	41,24	ARENAS				
200	0,074	38	FINOS				
Fondo	..	0					



- Granulometría suelo tratado con bioinsecticida por 8 meses

# tamiz	Diametro (mm)	% Pasa	D10	D30	D60	CU	CC
			0,074				
4	4,75	99,96		0,074			
8	2,36	99,68			0,277891637		
10	2	99,16				3,755292386	
40	0,42	72,24					0,269996001

60	0,25	57,18666667		
80	0,21	47,54	GRAVAS	0,04
100	0,149	44,86666667	ARENAS	59,06666667
200	0,074	40,89333333	FINOS	40,89333333
Fondo	..	0		



- Análisis de N, P, C

1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	
Cliente:	PROYECTO BI 066-0118-2400.
Dirección:	Km. 7 Vía a Piedecuesta
Código:	25
Tipo de muestra:	SUELO - Primer Viaje
Lugar de Muestreo:	Control
Fecha de Muestreo:	2018-02-06 - Hora: 6:19
Fecha de Recepción:	2018-04-06
Fecha de Reporte:	2018-05-02

2. REPORTE DE RESULTADOS

VARIABLE	UNIDADES	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	FECHA DE ANALISIS	METODO
Carbono Orgánico Total*	%C	0.61	—	2018-05-04	Colorimétrico, Walkley Black, K ₂ Cr ₂ O ₇ -H ₂ SO ₄
Fosforo Total	mg PO ₄ /kg	104	0.26	2018-04-18	SM 4500 P B,E
Nitrógeno Total	mg NTK/kg	476	5.00	2018-04-16 - 2018-04-17	SM 4500 Norg B - SM 4500 NH ₃ B, C

*Parámetros Subcontratados.

3. OBSERVACIONES

El muestreo fue realizado por el Cliente.

Revisó y Aprobó:

Firma: _____
Nombre: Coo. Diego Leonardo Blanco Arenas
Tarjeta Profesional: PQ-4230
Coordinador Laboratorio de Estudios Ambientales

Los resultados reportados corresponden únicamente a las muestras analizadas

El contenido del reporte no se puede reproducir parcialmente, solo en forma total previa autorización del Laboratorio de Estudios Ambientales.

FIN DEL REPORTE

1 de 1

1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

Cliente:	PROYECTO BI 066-0118-2400.
Dirección:	Km. 7 Vía a Piedecuesta
Código:	26
Tipo de muestra:	SUELO – Primer Viaje
Lugar de Muestreo:	Sin Insecticida Biológico
Fecha de Muestreo:	2018-02-02 - Hora: 6:13
Fecha de Recepción:	2018-04-06
Fecha de Reporte:	2018-05-04

2. REPORTE DE RESULTADOS

VARIABLE	UNIDADES	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	FECHA DE ANALISIS	METODO
Carbón Orgánico Total*	%C	0.96	—	2018-06-04	Colorimétrico, Walkley Black K ₂ Cr ₂ O ₇ -H ₂ SO ₄
Fosforo Total	mg PO ₄ /kg	179	0.26	2018-04-18	SM 4500 P B,E
Nitrógeno Total	mg NTK/kg	420	5.00	2018-04-16 - 2018-04-17	SM 4500 Norg B - SM 4500 NH ₃ B, C

*Parámetros Subcontratados.

3. OBSERVACIONES

El muestreo fue realizado por el Cliente.

Revisó y Aprobó:

Firma: _____
Nombre: Cco. Diego Leonardo Blanco Arenas
Tarjeta Profesional: PQ-4230
Coordinador Laboratorio de Estudios Ambientales

Los resultados reportados corresponden únicamente a las muestras analizadas

El contenido del reporte no se puede reproducir parcialmente, solo en forma total previa autorización del Laboratorio de Estudios Ambientales.

FIN DEL REPORTE

1 de 1

1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

Ciente:	PROYECTO BI 066-0118-2400.
Dirección:	Km. 7 Vía a Piedecuesta
Código:	27
Tipo de muestra:	SUELO – Primer Viaje
Lugar de Muestreo:	Biológico con 1 día de Insecticida
Fecha de Muestreo:	2018-02-10 – Hora: 3:15
Fecha de Recepción:	2018-04-06
Fecha de Reporte:	2018-05-04

2. REPORTE DE RESULTADOS

VARIABLE	UNIDADES	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	FECHA DE ANALISIS	METODO
Carbón Orgánico Total*	%C	0.73	—	2018-05-04	Colorimétrico, Walkley Black $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$
Fósforo Total	mg PO ₄ /kg	140	0.26	2018-04-18	SM 4500 P B,E
Nitrógeno Total	mg NTK/kg	532	5.00	2018-04-16 a 2018-04-17	SM 4500 Norg B - SM 4500 NH ₃ B, C

*Parámetros Subcontrolados.

3. OBSERVACIONES

El muestreo fue realizado por el Cliente

Revisó y Aprobó:

Firma: _____
Nombre: Goo. Diego Leonardo Blanco Arenas
Tarjeta Profesional: PQ-4230
Coordinador Laboratorio de Estudios Ambientales

Los resultados reportados corresponden únicamente a las muestras analizadas

El contenido del reporte no se puede reproducir parcialmente, solo en forma total previa autorización del Laboratorio de Estudios Ambientales

FIN DEL REPORTE

1 de 1

1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

Cliente:	PROYECTO BI 066-0118-2400.
Dirección:	Km. 7 Vía a Piedecuesta
Código:	28
Tipo de muestra:	SUELO – Primer Viaje
Lugar de Muestreo:	Químico con 1 día de Insecticida
Fecha de Muestreo:	2018-02-09 – Hora: 6:09
Fecha de Recepción:	2018-04-06
Fecha de Reporte:	2018-05-04

2. REPORTE DE RESULTADOS

VARIABLE	UNIDADES	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	FECHA DE ANALISIS	METODO
Carbon Orgánico Total*	%C	0.98	—	2018-05-04	Colorimétrico, Walkley Black K ₂ Cr ₂ O ₇ -H ₂ SO ₄
Fosforo Total	mg PO ₄ /kg	123	0.26	2018-04-16	SM 4500 P B,E
Nitrógeno Total	mg NTK/kg	448	5.00	2018-04-16 a 2018-04-17	SM 4500 Norg B - SM 4500 NH ₃ B, C

*Parámetros Subcortados.

3. OBSERVACIONES

El muestreo fue realizado por el Cliente

Revisó y Aprobó:

Firma: _____
Nombre: Goo. Diego Leonardo Blanco Arenas
Tarjeta Profesional: PQ-4230
Coordinador Laboratorio de Estudios Ambientales

Los resultados reportados corresponden únicamente a las muestras analizadas

El contenido del reporte no se puede reproducir parcialmente, solo en forma total previa autorización del Laboratorio de Estudios Ambientales.

FIN DEL REPORTE

1 de 1

1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	
Cliente:	PROYECTO BI 066-0118-2400.
Dirección:	Km. 7 Vía a Piedecuesta
Código:	33
Tipo de muestra:	SUELO – Segundo Viaje
Lugar de Muestreo:	Biológica con 1 mes y 1 día de aplicación
Fecha de Muestreo:	2018-03-10
Fecha de Recepción:	2018-04-06
Fecha de Reporte:	2018-05-04

2. REPORTE DE RESULTADOS

VARIABLE	UNDADES	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	FECHA DE ANALISIS	METODO
Carbono Orgánico Total*	%C	0.73	—	2018-05-04	Colorimétrico, Walkley Black $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$
Fósforo Total	mg PO ₄ /kg	136	0.25	2018-04-18	SM 4500 P B,E
Nitrógeno Total	mg NTK/kg	504	5.00	2018-04-16 - 2018-04-17	SM 4500 Norg B - SM 4500 NH ₃ B, C

*Parámetros Subcontratados.

3. OBSERVACIONES

El muestreo fue realizado por el Cliente.

Revisó y Aprobó:

Firma: _____
 Nombre: Coo. Diego Leonardo Blanco Arenas
 Tarjeta Profesional: PQ-4230
 Coordinador Laboratorio de Estudios Ambientales

Los resultados reportados corresponden únicamente a las muestras analizadas

El contenido del reporte no se puede reproducir parcialmente, solo en forma total previa autorización del Laboratorio de Estudios Ambientales.

FIN DEL REPORTE

1 de 1

1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

Cliete:	PROYECTO BI 066-0118-2400.
Dirección:	Km. 7 Vía a Piedecuesta
Código:	34
Tipo de muestra:	SUELO – Segundo Vaje
Lugar de Muestreo:	Insecticida Químico
Fecha de Muestreo:	2018-03-09
Fecha de Recepción:	2018-04-06
Fecha de Reporte:	2018-05-02

2. REPORTE DE RESULTADOS

VARIABLE	UNIDADES	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	FECHA DE ANALISIS	METODO
Carbono Orgánico Total*	%C	1,26	—	2018-05-04	Colorimétrico, Walkley Black K ₂ Cr ₂ O ₇ -H ₂ SO ₄
Fosforo Total	mg PO ₄ /kg	142	0,26	2018-04-18	SM 4500 P B,E
Nitrogeno Total	mg NTK/kg	532	5,00	2018-04-16 - 2018-04-17	SM 4500 Norg B - SM 4500 NH ₃ B, C

*Parámetros Subcontrolados.

3. OBSERVACIONES

El muestreo fue realizado por el Cliente.

Revisó y Aprobó:

Firma: _____
Nombre: Gco. Diego Leonardo Blanco Arenas
Tarjeta Profesional: PQ-4230
Coordinador Laboratorio de Estudios Ambientales

Los resultados reportados corresponden únicamente a las muestras analizadas

El contenido del reporte no se puede reproducir parcialmente, solo en forma total previa autorización del Laboratorio de Estudios Ambientales.

FIN DEL REPORTE

1 de 1

Anexo B. Análisis estadístico de los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los suelos

Cambio en las propiedades del Suelo Blanco (SB)						
Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Análisis estadístico		
				Media	Desviación Estándar	Varianza
Arcilla (%)	26	22	20,05	22,5512249	3,033287545	6,133888889
Limo (%)	5,3	10,61	9,28	8,05093666	2,763011642	5,089488889
Arena (%)	68,7	67,39	70,67	68,9068549	1,651029982	1,817266667
Infiltración (H₂O cm/h)	268,9	239,3	153,9	214,745484	59,71365003	2377,146667
Densidad aparente (g/ml)	1,64	1,29	1,43	1,44629382	0,176162803	0,020688889
Porosidad (%)	18,7	36,45	38,22	29,6444416	10,79525976	77,69175556
Densidad real (g/ml)	2	2	2,3	2,09537911	0,173205081	0,02
Aluminio Intercambiable (meq/100g)	3,5	3,3	2,8	3,18600661	0,360555128	0,086666667
Acidez Intercambiable (meq/100g)	3,3	3,3	2,8	3,12412669	0,288675135	0,055555556
Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100g)	12,4	8,1	7,8	9,21864524	2,573583753	4,415555556
Carbono orgánico total (%)	0,72	0,6		0,65726707	0,084852814	0,0036
Materia Orgánica (%)	1,7	2,2	1,7	1,93390796	0,353553391	0,0625
Fosforo total (mg PO₄/kg)	120	141		130,0769	14,8492424	110,25
Nitrógeno total (mg NTK/kg)	448	504		475,175757	39,59797975	784
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0,61	0,71	1,17	0,79724416	0,29866369	0,059466667

Cambio en las propiedades del Suelo Control (SC)						
Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Análisis estadístico		
				Media	Desviación Estándar	Varianza
Arcilla (%)	22,43	20,67	18,05	20,3024751	2,204026618	3,23848889
Limo (%)	8,85	5,33	5,28	6,29170185	2,046859383	2,79308889
Arena (%)	68,72	74	76,67	73,0544672	4,045775575	10,9122
Infiltración (H₂O cm/h)	365,8	47,5	115,1	125,990426	167,6977142	18748,3489
Densidad aparente (g/ml)	1,64	1,29	1,35	1,41880412	0,187171935	0,02335556
Porosidad (%)	25,6	33,16	43,75	33,4664011	12,83398808	82,355625
Densidad real (g/ml)	2,2	1,9	2,2	2,09507538	0,173205081	0,02
pH	4,2	3,9	3,8	3,96307689	0,2081666	0,02888889
Aluminio Intercambiable (meq/100g)	3,1	3,1	2,6	2,92347182	0,288675135	0,05555556
Acidez Intercambiable (meq/100g)	3,2	3,1	3,1	3,1329812	0,057735027	0,00222222
Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100g)	9,1	6,8	8,8	8,1660304	1,250333289	1,04222222
Carbono orgánico total (%)	0,61	0,74	x	0,67186308	0,091923882	0,004225
Materia Orgánica (%)	2,5	2,6	1,8	2,27018868	0,435889894	0,12666667

Fosforo total (mg PO₄/kg)	104	119	x	111,247472	10,60660172	56,25
Nitrógeno total (mg NTK/kg)	476	532	x	503,221621	39,59797975	784
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0,52	0,64	2,44	0,93294859	1,075546373	0,7712

Cambio en las propiedades del Suelo Fumigado con el Bioinsecticida (SFB)								
Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Análisis Estadístico		
						Media	Desviación Estándar	Varianza
Arcilla (%)	26	23,3	24	24,8	20,7	23,6914972	1,983179266	3,1464
Limo (%)	6	8	8	7,3	9,3	7,6423585	1,202913131	1,1576
Arena (%)	68,1	68,7	69,2	68,1	70	68,8162526	0,804363102	0,5176
Infiltración (H₂Ocm/h)	-	-	-	-	226,74	226,74		0
Densidad aparente (g/ml)	1,64	-	1,29	-	1,52	1,47602048	0,177857621	0,02108889
Porosidad (%)	15,9	-	24,6	-	24	24,2981481	0,424264069	0,09
Densidad real (g/ml)	1,95	1,93	2,39	1,71	2	1,98428105	0,246738728	0,048704
Aluminio Intercambiable (meq/100g)	3,9	3,3	2,8	2,1	3,1	2,97895205	0,661815684	0,3504
Acidez Intercambiable (meq/100g)	3,5	3,5	3	2,5	3,6	3,19080284	0,465832588	0,1736
Capacidad de Intercambio Catiónico [meq / 100 g]	7,7	8,3	10,3	8,1	10,7	8,93830084	1,375499909	1,5136
Carbono orgánico total (%)	0,96	0,73	0,74	0,73	x	0,78439925	0,11343133	0,00965
Materia Orgánica (%)	2,3	2	2,2	2,5	2,7	2,32753841	0,270185122	0,0584
Fosforo total (mg PO₄/kg)	179	140	133	136	x	145,912636	21,52517905	347,5
Nitrógeno total (mg NTK/kg)	420	532	560	504	x	501,123618	60,48691319	2744
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0,51	0,42	0,6	0,96	1,82	0,59266665	0,236696008	0,04201875

Cambio en las propiedades del Suelo Fumigado con el Insecticida Químico (SFQ)								
Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Análisis Estadístico		
						Media	Desviación Estándar	Varianza
Arcilla (%)	25,15		24,67		8,61	17,4811539	9,413869201	59,0806222

Limo (%)	8,19		7,28		18,72	10,373 0636	6,358493008	26,9536222
Arena (%)	66,67		68,05		72,67	69,083 0094	3,14241945	6,5832
Infiltración (H₂Ocm/h)	397,57		274,68		294,49	318,00 7282	65,97963651	2902,20829
Densidad aparente (g/ml)	1,6	1,64	1,29	1,29	1,38	1,4322 0263	0,168967452	0,02284
Porosidad (%)	25,2	18	43	38	36	30,566 4864	10,1886211	83,0464
Densidad real (g/ml)	2,22	2	2,3	2,1	2,15	2,1515 6124	0,114367828	0,010464
pH	4,5	4,63	4,32	4,35	4,63	4,4840 4023	0,148087812	0,017544
Aluminio Intercambiable (meq/100g)	1,3	1,1	1,7	1,5	2,3	1,5301 0351	0,460434577	0,1696
Acidez Intercambiable (meq/100g)	2,9	2,7	2,4	3,2	3,1	2,8450 9607	0,320936131	0,0824
Capacidad de Intercambio Catiónico [meq / 100 g]	15,9	16,47	16,8	16	9,53	14,632 6363	3,046054826	7,42276
Carbono orgánico total (%)	0,98	1,08	1,26	1,16	X	1,1152 4322	0,118883697	0,0106
Materia Orgánica (%)	2,2	2,2	2,5	2,5	3,7	2,5691 261	0,622093241	0,3096
Fosforo total (mg PO₄/kg)	123	140	142	153	X	139,07 6333	12,39623599	115,25
Nitrógeno total (mg NTK/kg)	448	532	532	448	X	488,19 6682	48,49742261	1764
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0,5	0,7	0,2	1	1,9	0,6679 9056	0,650384502	0,3384

Anexo C. Parámetros de transporte insecticidas

- Conductividad hidráulica

Prueba de laboratorio (velocidad lineal media)

Prueba	Altura tubo (m)	Tiempo de filtración (s)	Velocidad observada (m/s)
1	0,1	1025	9,7561E-05
2	0,1	1017	9,83284E-05
3	0,1	1243	8,04505E-05
4	0,1	540	0,000185185
5	0,1	594	0,00016835
6	0,1	644	0,00015528

- Precipitación y Evaporación (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>)

Promedio	
Precip(cm/d)	EV cm/d
0,028181818	0,019727273
0,135272727	0,094690909
0,238636364	0,167045455
0,082363636	0,057654545
0,139636364	0,097745455
0,143545455	0,100481818
0,223	0,1561
0,184090909	0,128863636
0,059636364	0,041745455
0,092090909	0,064463636
0,036454545	0,025518182
0,139454545	0,097618182
0,039727273	0,027809091
0,061818182	0,043272727
0,189181818	0,132427273
0,169090909	0,118363636
0,181909091	0,127336364
0,186818182	0,130772727

0,196545455	0,137581818
0,129	0,0903
0,043363636	0,030354545
0,101272727	0,070890909
0,139	0,0973
0,182636364	0,127845455
0,064727273	0,045309091
0,062545455	0,043781818
0,082727273	0,057909091
0,014727273	0,010309091
0,045545455	0,031881818
0,139727273	0,097809091
0,135727273	0,095009091
0,075	0,0525
0,235363636	0,164754545
0,164909091	0,115436364
0,107454545	0,075218182
0,213363636	0,149354545
0,343363636	0,240354545
0,162090909	0,113463636
0,661272727	0,462890909
0,424454545	0,297118182
0,164090909	0,114863636
0,060363636	0,042254545
0,245636364	0,171945455
0,278727273	0,195109091
0,078454545	0,054918182
0,053454545	0,037418182
0,310090909	0,217063636
0,290909091	0,203636364
0,109727273	0,076809091
0,266545455	0,186581818
0,154727273	0,108309091
0,050181818	0,035127273
0,093454545	0,065418182
0,096909091	0,067836364
0,154727273	0,108309091
0,233909091	0,163736364
0,330818182	0,231572727
0,456636364	0,319645455
0,328	0,2296
0,203818182	0,142672727
0,593727273	0,415609091

0,212636364	0,148845455
0,073545455	0,051481818
0,412636364	0,288845455
0,310363636	0,217254545
0,270363636	0,189254545
0,251272727	0,175890909
0,514454545	0,360118182
0,355454545	0,248818182
0,433090909	0,303163636
0,278727273	0,195109091
0,196272727	0,137390909
0,171090909	0,119763636
0,148363636	0,103854545
0,106	0,0742
0,267727273	0,187409091
0,450818182	0,315572727
0,445727273	0,312009091
0,307727273	0,215409091
0,198363636	0,138854545
0,297454545	0,208218182
0,226545455	0,158581818
0,418181818	0,292727273
0,429727273	0,300809091
0,227454545	0,159218182
0,102	0,0714
0,373909091	0,261736364
0,282818182	0,197972727
0,862727273	0,603909091
0,549909091	0,384936364
0,351272727	0,245890909
0,768181818	0,537727273
0,606272727	0,424390909
0,384454545	0,269118182
0,402090909	0,281463636
0,5	0,35
0,376	0,2632
0,434727273	0,304309091
0,504181818	0,352927273
0,314727273	0,220309091
0,339181818	0,237427273
0,556818182	0,389772727
0,767636364	0,537345455
0,311818182	0,218272727

0,224727273	0,157309091
0,277363636	0,194154545
0,187181818	0,131027273
0,471727273	0,330209091
0,340363636	0,238254545
0,665272727	0,465690909
0,748545455	0,523981818
0,380545455	0,266381818
0,518727273	0,363109091
0,399727273	0,279809091
0,592909091	0,415036364
0,277181818	0,194027273
0,494090909	0,345863636
0,403909091	0,282736364
0,439727273	0,307809091
0,295	0,2065
0,491909091	0,344336364
0,722545455	0,505781818
1,077454545	0,754218182
0,885090909	0,619563636
0,634636364	0,444245455
0,597272727	0,418090909
0,675363636	0,472754545
0,572	0,4004
0,519727273	0,363809091
0,575545455	0,402881818
0,363636364	0,254545455
0,342727273	0,239909091
0,340727273	0,238509091
0,390545455	0,273381818
0,517	0,3619
0,327909091	0,229536364
0,213818182	0,149672727
0,253272727	0,177290909
0,444363636	0,311054545
0,475272727	0,332690909
0,235363636	0,164754545
0,243545455	0,170481818
0,273636364	0,191545455
0,161181818	0,112827273
0,180909091	0,126636364
0,424454545	0,297118182
0,583545455	0,408481818

0,599363636	0,419554545
0,266090909	0,186263636
0,536363636	0,375454545
0,492545455	0,344781818
0,429272727	0,300490909
0,249272727	0,174490909
0,146545455	0,102581818
0,210818182	0,147572727
0,147272727	0,103090909
0,277181818	0,194027273
0,169818182	0,118872727
0,161727273	0,113209091
0,468272727	0,327790909
0,482454545	0,337718182
0,313	0,2191
0,438727273	0,307109091
0,347636364	0,243345455
0,282	0,1974
0,705363636	0,493754545
0,419	0,2933
0,229636364	0,160745455
0,336909091	0,235836364
0,309272727	0,216490909
0,369272727	0,258490909
0,277181818	0,194027273
0,278545455	0,194981818
0,213636364	0,149545455
0,452636364	0,316845455
0,362	0,2534
0,235454545	0,164818182
0,381909091	0,267336364
0,121090909	0,084763636
0,605454545	0,423818182
0,439545455	0,307681818
0,438909091	0,307236364
0,248363636	0,173854545
0,172090909	0,120463636
0,148090909	0,103663636
0,158727273	0,111109091
0,547454545	0,383218182
0,244090909	0,170863636
0,057090909	0,039963636
0,266727273	0,186709091

0,544727273	0,381309091
0,264909091	0,185436364
0,611818182	0,428272727
0,258181818	0,180727273
0,588636364	0,412045455
0,561454545	0,393018182
0,342272727	0,239590909
0,279818182	0,195872727
0,258090909	0,180663636
0,549	0,3843
0,593636364	0,415545455
0,312636364	0,218845455
0,205454545	0,143818182
0,323454545	0,226418182
0,168909091	0,118236364
0,301636364	0,211145455
0,258454545	0,180918182
0,201272727	0,140890909
0,565181818	0,395627273
0,386454545	0,270518182
0,590545455	0,413381818
0,189636364	0,132745455
0,330727273	0,231509091
0,249272727	0,174490909
0,154818182	0,108372727
0,420636364	0,294445455
0,212	0,1484
0,442909091	0,310036364
0,276	0,1932
0,348090909	0,243663636
0,308181818	0,215727273
0,327909091	0,229536364
0,715636364	0,500945455
0,562454545	0,393718182
0,343454545	0,240418182
0,329272727	0,230490909
0,258636364	0,181045455
0,255181818	0,178627273
0,427727273	0,299409091
0,525818182	0,368072727
0,850545455	0,595381818
0,322454545	0,225718182
0,466727273	0,326709091

0,350636364	0,245445455
0,824454545	0,577118182
0,489909091	0,342936364
0,484909091	0,339436364
0,408181818	0,285727273
0,346090909	0,242263636
0,395181818	0,276627273
0,315454545	0,220818182
0,386545455	0,270581818
0,366272727	0,256390909
0,153727273	0,107609091
0,293090909	0,205163636
0,346909091	0,242836364
0,234181818	0,163927273
0,193090909	0,135163636
0,520363636	0,364254545
0,523272727	0,366290909
0,426818182	0,298772727
0,654090909	0,457863636
0,181818182	0,127272727
0,316181818	0,221327273
0,430727273	0,301509091
0,398	0,2786
0,193	0,1351
0,274	0,1918
0,245181818	0,171627273
0,411545455	0,288081818
0,287272727	0,201090909
0,815272727	0,570690909
0,406909091	0,284836364
0,358272727	0,250790909
0,529727273	0,370809091
0,530090909	0,371063636
0,189909091	0,132936364
0,343272727	0,240290909
0,606545455	0,424581818
0,630090909	0,441063636
0,302090909	0,211463636
0,261090909	0,182763636
0,481363636	0,336954545
0,633090909	0,443163636
0,844363636	0,591054545
0,599090909	0,419363636

0,528545455	0,369981818
0,700818182	0,490572727
0,611909091	0,428336364
1,076090909	0,753263636
0,804363636	0,563054545
0,611545455	0,428081818
0,659818182	0,461872727
0,764727273	0,535309091
0,528727273	0,370109091
0,634454545	0,444118182
0,489909091	0,342936364
0,731909091	0,512336364
0,579363636	0,405554545
0,541454545	0,379018182
0,674636364	0,472245455
0,477363636	0,334154545
0,860636364	0,602445455
0,323454545	0,226418182
0,352727273	0,246909091
0,524	0,3668
0,767	0,5369
0,540545455	0,378381818
0,375454545	0,262818182
0,365181818	0,255627273
0,530636364	0,371445455
0,712636364	0,498845455
0,253545455	0,177481818
0,356545455	0,249581818
0,538181818	0,376727273
1,097818182	0,768472727
0,571090909	0,399763636
0,519454545	0,363618182
0,532636364	0,372845455
0,465818182	0,326072727
0,703	0,4921
0,382272727	0,267590909
0,452272727	0,316590909
0,326272727	0,228390909
0,327454545	0,229218182
0,674363636	0,472054545
0,420363636	0,294254545
0,367272727	0,257090909
0,816090909	0,571263636

1,137454545	0,796218182
0,880454545	0,616318182
1,061090909	0,742763636
0,550181818	0,385127273
0,501363636	0,350954545
0,309272727	0,216490909
0,801909091	0,561336364
0,520272727	0,364190909
0,380181818	0,266127273
0,308909091	0,216236364
0,517272727	0,362090909
0,391545455	0,274081818
0,766545455	0,536581818
0,347090909	0,242963636
0,326636364	0,228645455
0,514	0,3598
0,357	0,2499
0,573090909	0,401163636
0,397818182	0,278472727
0,318181818	0,222727273
0,251727273	0,176209091
0,388363636	0,271854545
0,308727273	0,216109091
0,228818182	0,160172727
0,178545455	0,124981818
0,136909091	0,095836364
0,336727273	0,235709091
0,277909091	0,194536364
0,268727273	0,188109091
0,192454545	0,134718182
0,169	0,1183
0,253545455	0,177481818
0,549545455	0,384681818
0,692	0,4844
0,281454545	0,197018182
0,026	0,0182
0,134	0,0938
0,166818182	0,116772727
0,045545455	0,031881818
0,020454545	0,014318182
0,145909091	0,102136364
0,146454545	0,102518182
0,142363636	0,099654545

0,062909091	0,044036364
0,082727273	0,057909091
0,085090909	0,059563636