



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Efecto de la aplicación de ácidos húmicos sobre propiedades químicas del suelo y plantas de lechuga Batavia**

**Angie Viviana Suárez Acosta**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2020



# **Efecto de la aplicación de ácidos húmicos sobre propiedades químicas del suelo y plantas de lechuga Batavia**

**Angie Viviana Suárez Acosta**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Magister en Ciencias Agrarias- Línea de Suelos y Aguas**

Director (a):

Ph.D. Jaime Torres Bazurto

Línea de Investigación:

Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2021



## *Dedicatoria*

*Dedico este trabajo a mi madre Gilma, a mis hermanos Camilo y Lizeth, por su apoyo y por ser el principal motor de todos mis logros.*

*En memoria de mi padre Orlando.*



## Declaración de obra original

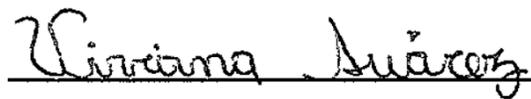
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

A handwritten signature in black ink, reading "Viviana Suárez", written over a horizontal line.

Angie Viviana Suárez Acosta

Fecha: 26/11/2020

## **Agradecimientos**

En primer lugar, a Dios, por permitirme cumplir todos mis sueños.

A la Universidad Nacional de Colombia, por darme todas las bases de mi formación profesional.

A mi profesor y director de tesis, Jaime Torres, por su orientación, paciencia y apoyo constante en todo el proceso de esta investigación.

A Disan Colombia S.A., por darme el espacio y apoyo para realizar el presente trabajo.

## Resumen

Esta investigación evaluó el efecto de la aplicación de ácidos húmicos (AH) extraídos de Leonardita en un suelo Humic Haplustands, sembrado con lechuga Batavia, sobre propiedades químicas del suelo, contenido de nutrientes en hojas de lechuga, rendimiento del cultivo, niveles de acumulación de metales pesados en suelo y planta. Se empleó un diseño de medidas repetidas asociado a un diseño completamente al azar, con cuatro tratamientos, como factor entre-sujetos: testigo  $0 \text{ l ha}^{-1}$  (T0);  $20 \text{ l ha}^{-1}$  (T20);  $40 \text{ l ha}^{-1}$  (T40) y  $60 \text{ l ha}^{-1}$  (T60), cuatro repeticiones y como componente intra-sujetos dos ciclos de producción. Los datos se analizaron empleando estadística univariada y multivariada. Los resultados mostraron que la aplicación de AH extraídos de Leonardita, para ambos ciclos de producción, incrementó la CICE, los contenidos de CO, K y Zn, los contenidos foliares de Zn, Cu, Fe y el rendimiento de lechuga; acrecentó los contenidos de metales pesados en suelo y los disminuyó en tejido foliar; aumentó para un solo ciclo los contenidos de S, Fe, Mn y Cu en suelo. El T60 obtuvo las mejores respuestas en las variables evaluadas en comparación a los demás tratamientos. Se concluye que, la aplicación de AH extraídos de Leonardita, tuvo efectos positivos sobre la mayoría de los parámetros evaluados en esta investigación, mejorando las condiciones químicas del suelo, la absorción de nutrientes, el rendimiento de la lechuga y reduciendo la absorción de metales pesados por parte de la planta, con mejor respuesta de las dosis altas. Las diferencias en precipitación para los dos ciclos afectaron las respuestas, tanto en suelo como en planta, de la aplicación de AH.

**Palabras clave:** sustancias orgánicas, fertilización, hortalizas, contaminación

## Abstract

This research evaluated the effect of the application of humic acids (HA) extracted from Leonardite in a Humic Haplustands soil, planted with Batavia lettuce, on chemical properties of the soil, content of nutrients in lettuce leaves, crop yield, accumulation levels of heavy metals in soil and plant. A repeated measures design associated with a completely randomized design, with four treatments, was used as a between-subject factor: control 0 l ha<sup>-1</sup> (T0); 20 l ha<sup>-1</sup> (T20); 40 l ha<sup>-1</sup> (T40) and 60 l ha<sup>-1</sup> (T60), four repetitions and as an intra-subject component two production cycles. Data were analyzed using univariate and multivariate statistics. The results show that the application of HA extracted from Leonardite, for both production cycles, increased the CICE, the CO, K and Zn contents, the foliar contents of Zn, Cu, Fe and the lettuce yield; increased the content of heavy metals in soil and decreased them in leaf tissue; increased the contents of S, Fe, Mn and Cu in soil for a single cycle. The T60 obtained the best responses in the variables evaluated in comparison with the other treatments. It is concluded that the application of HA extracted from Leonardite had positive effects on most of the parameters evaluated in this research, improving chemical conditions of the soil, absorption of nutrients, lettuce yield and reducing the absorption of heavy metals. by the plant, with a better response to high doses. The differences in precipitation for the two cycles affected the responses, for soil and plant, to the HA application.

**Keywords:** organic substances, fertilization, vegetables, pollution

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>X</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XV</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas</b> .....	<b>XVI</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Capítulo 1: Respuesta de un suelo Humic Haplustands a la aplicación de ácidos húmicos extraídos de Leonardita</b> .....	<b>5</b>
1.1 Resumen.....	5
1.2 Abstract.....	5
1.3 Introducción.....	6
1.4 Materiales y métodos .....	9
1.4.1 Descripción del sitio.....	9
1.4.2 Descripción del suelo.....	9
1.4.3 Establecimiento experimental .....	10
1.4.4 Diseño experimental y tratamientos .....	10
1.4.5 Muestreo y análisis de suelos .....	11
1.4.6 Análisis estadístico y procesamiento de datos .....	11
1.5 Resultados y discusión.....	12
1.5.1 Propiedades químicas del suelo (pH, CO y CICE) .....	12
1.5.2 Contenido de nutrientes en el suelo (P, K, Ca, Mg, S, B, Fe, Zn, Cu y Mn).....	15
1.6 Conclusión .....	24
1.7 Bibliografía .....	25
<b>2. Capítulo 2: Respuesta de la lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) a la aplicación de ácidos húmicos extraídos de Leonardita</b> .....	<b>30</b>
2.1 Resumen.....	30
2.2 Abstract.....	30
2.3 Introducción.....	31
2.4 Materiales y métodos .....	34
2.4.1 Descripción del sitio.....	34
2.4.2 Descripción del suelo.....	34
2.4.3 Establecimiento experimental .....	35
2.4.4 Diseño experimental y tratamientos .....	35

2.4.5	Muestreo y análisis de tejido foliar.....	36
2.4.6	Determinación del peso fresco y cálculo del rendimiento del cultivo.....	36
2.4.7	Análisis estadístico y procesamiento de datos .....	36
2.5	Resultados y discusión .....	37
2.5.1	Contenido de nutrientes en tejido foliar .....	37
2.5.2	Peso fresco y rendimiento del cultivo .....	46
2.6	Conclusión.....	48
2.7	Bibliografía.....	48
<b>3.</b>	<b>Capítulo 3: Ácidos húmicos y su efecto sobre los contenidos de metales pesados en suelo y en hojas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) .....</b>	<b>55</b>
3.1	Resumen .....	55
3.2	Abstract .....	56
3.3	Introducción .....	56
3.4	Materiales y métodos.....	59
3.4.1	Descripción del sitio .....	59
3.4.2	Descripción del suelo .....	59
3.4.3	Establecimiento experimental.....	59
3.4.4	Diseño experimental y tratamientos.....	60
3.4.5	Muestreo y análisis de suelos.....	60
3.4.6	Muestreo y análisis de tejido foliar.....	60
3.4.7	Análisis estadístico y procesamiento de datos .....	61
3.5	Resultados y discusión .....	61
3.5.1	Contenidos de Pb, Cr, Cd y Ni en el suelo.....	61
3.5.2	Contenido de Pb, Cr, Cd y Ni en tejido foliar .....	67
3.6	Conclusión.....	71
3.7	Bibliografía.....	71
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>77</b>
4.1	Conclusiones .....	77
4.2	Recomendaciones .....	77
<b>A.</b>	<b>Anexo A: Localización de la zona de estudio .....</b>	<b>79</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo B: Distribución de los tratamientos .....</b>	<b>81</b>
<b>C.</b>	<b>Anexo C: Condiciones climáticas en la investigación .....</b>	<b>82</b>
<b>D.</b>	<b>Anexo D: Tablas resumen del análisis de perfiles .....</b>	<b>84</b>
<b>E.</b>	<b>Anexo E: Ejemplo de análisis de perfiles para la variable Nitrógeno foliar ...</b>	<b>86</b>
<b>F.</b>	<b>Anexo F: Ejemplo de análisis estadístico para la variable carbono orgánico para el primer ciclo .....</b>	<b>88</b>
<b>G.</b>	<b>Anexo G: Resumen del análisis estadístico del peso promedio de lechuga</b>	<b>103</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>107</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de CO en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia. ....	13
<b>Figura 1-2:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre la CICE en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	14
<b>Figura 1-3:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de P en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia. ....	16
<b>Figura 1-4:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de K en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia. ....	17
<b>Figura 1-5:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de S en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia. ....	19
<b>Figura 1-6:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Fe en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia. ....	21
<b>Figura 1-7:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Zn en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia .....	22
<b>Figura 1-8:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Cu en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia. ....	23
<b>Figura 1-9:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Mn en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia. ....	24
<b>Figura 2-1:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de N en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia. ....	38
<b>Figura 2-2:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de P en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia .....	39
<b>Figura 2-3:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de K en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia .....	40
<b>Figura 2-4:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de B en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia .....	42

<b>Figura 2-5:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Fe en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	<b>43</b>
<b>Figura 2-6:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Zn en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	<b>44</b>
<b>Figura 2-7:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Cu en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	<b>45</b>
<b>Figura 2-8:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Mn en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	<b>46</b>
<b>Figura 2-9:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el peso fresco promedio para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	<b>47</b>
<b>Figura 3-1:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Pb en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	<b>63</b>
<b>Figura 3-2:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Cr en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	<b>64</b>
<b>Figura 3-3:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Cd en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	<b>65</b>
<b>Figura 3-4:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Ni en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	<b>66</b>
<b>Figura 3-5:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Cd en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	<b>69</b>
<b>Figura 3-6:</b> Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Ni en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.....	<b>70</b>
<b>Figura A-1:</b> Localización de la zona de estudio.....	<b>79</b>
<b>Figura C-1:</b> Precipitación total mensual para cada ciclo de producción.....	<b>82</b>
<b>Figura C-2:</b> Temperatura promedio diaria para cada ciclo de producción.....	<b>83</b>
<b>Figura E-1:</b> Análisis de perfiles para el contenido de N foliar en el primer ciclo.....	<b>86</b>
<b>Figura E-2:</b> Análisis de perfiles para el contenido de N foliar en el segundo ciclo.....	<b>88</b>
<b>Figura G-1:</b> Boxplot del peso promedio de lechuga por tratamiento para el ciclo 1 ..	<b>104</b>
<b>Figura G-2:</b> Boxplot del peso promedio de lechuga por tratamiento para el ciclo 2 ..	<b>106</b>

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1-1:</b> Análisis químico de suelo inicial para cada ciclo .....	<b>9</b>
<b>Tabla 1-2:</b> Método de análisis y valoración para cada parámetro del suelo determinado 11	
<b>Tabla 2-1:</b> Análisis químico de suelo inicial para cada ciclo .....	<b>35</b>
<b>Tabla 2-2:</b> Método de análisis y valoración para cada parámetro del suelo determinado 36	
<b>Tabla 2-3:</b> Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> ) de lechuga Batavia por ciclo y por tratamiento.....	<b>47</b>
<b>Tabla 3-1:</b> Análisis químico de suelo inicial para cada ciclo .....	<b>59</b>
<b>Tabla 3-2:</b> Valores mínimos y máximos para cada elemento en cada ciclo.....	<b>62</b>
<b>Tabla D-1:</b> Resumen del análisis de perfiles para variables del capítulo 1 .....	<b>84</b>
<b>Tabla D-3:</b> Resumen del análisis de perfiles para variables del capítulo 3.....	<b>85</b>

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Símbolos con letras latinas

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>
<i>t</i>	Tonelada
<i>kg</i>	Kilogramo
<i>mg</i>	Miligramo
<i>%</i>	Porcentaje
<i>ha</i>	Hectárea

## Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>AH</i>	Ácido húmico
<i>dds</i>	Días después de siembra
<i>ddt</i>	Días después de trasplante

# Introducción

El suelo es un cuerpo natural que está constituido por tres fases (sólida, líquida y gaseosa), la fase sólida está formada por una fracción mineral y una orgánica, este cuerpo natural es producto de los factores y procesos de formación que definen características edafogenéticas y son la base para clasificar los suelos taxonómicamente (Soil Survey Staff, 1999), por ejemplo, en la Sabana de Bogotá, ubicada en la Altiplanicie Cundiboyacense, dominan los suelos Inceptisoles, Andisoles y Alfisoles (IGAC, 2012). La función principal del suelo es dar soporte y ser un medio ambiente apropiado para el desarrollo de las plantas (Soil Survey Staff, 1999).

El suelo en el que se llevó a cabo la presente investigación es un Andisol, orden que se caracteriza por tener moderado grado de desarrollo evolutivo, se ha formado a partir de depósitos piroclásticos superficiales no consolidados, esencialmente mantos de ceniza volcánica transportadas y depositadas por eventos eólicos, con altos contenidos de materia orgánica (IGAC, 2012), sin embargo, favorecen la formación de complejos órgano-minerales que afectan la tasa de mineralización de la materia orgánica en comparación a otros suelos (Ortiz *et al*, 2006; Africando *et al*. 2016).

Dentro de la materia orgánica del suelo, se encuentran las sustancias húmicas que se consideran claves para el ecosistema terrestre, siendo responsables de muchas reacciones químicas complejas, por ejemplo, interactuando con iones metálicos, óxidos, hidróxidos, minerales y compuestos orgánicos e influyendo en la disponibilidad de nutrientes (Nardi *et al.*, 2009). Uno de los factores que afecta positivamente la dinámica de la materia orgánica y de las sustancias húmicas en suelos agrícolas, es la aplicación adecuada de enmiendas o fertilizantes orgánicos (Paul, 2016).

Una de las fuentes que se ha utilizado en los últimos años en Colombia para el aporte de materia orgánica es la Leonardita, material mineral que corresponde a una forma oxidada de lignitos de carbón, que se usa para la extracción de ácidos húmicos (AH); es un material

complejo constituido predominantemente de carbono y materiales húmicos (Schwarzenbach *et al.*, 1993; Sugier *et al.*, 2013). Estos productos han sido comercializados y usados bajo el supuesto que su aplicación mejora las condiciones del suelo, aumentando la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes, sin embargo, estos efectos no han sido validados en suelos de la Sabana de Bogotá a través de procesos investigativos, por lo cual, se hace necesaria su evaluación.

En el caso de suelos diferentes a los de la Sabana de Bogotá, este efecto ha sido evaluado en diferentes investigaciones que han concluido que, aumenta el pH, el contenido de carbono orgánico y tienen efecto en la disponibilidad tanto de macronutrientes como de micronutrientes (Kołodziej *et al.*, 2013; Sugier *et al.*, 2013; Olego *et al.*, 2015; Ciarkowska *et al.*, 2017).

Con base en la relación suelo-planta, la adición de AH al suelo tendrá un efecto evidente en el crecimiento de éstas, por lo que, la planta puede ser indicadora de si estos son benéficos o no, y para el caso específico de esta investigación se seleccionó la lechuga, una de las hortalizas de mayor importancia económica para el departamento de Cundinamarca, principal productor (CCB, 2015). La aplicación de AH ha sido evaluada en otros cultivos diferentes a lechuga, con respuestas positivas de estos en la absorción de nutrientes (Cangi *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2010; Khaled y Fawy, 2011). Es importante tomar en cuenta que uno de los factores que incide sobre la respuesta del suelo y la planta a la aplicación de AH y fertilizantes en general, es la humedad del suelo, la cual depende de la precipitación o de la aplicación de riego.

El empleo de aguas contaminadas provenientes del río Bogotá, para labores de riego en los cultivos de hortalizas de la Sabana de Bogotá es común, trayendo como consecuencia la acumulación de metales pesados y de sustancias orgánicas e inorgánicas potencialmente tóxicas (Montenegro, 2002). La lechuga es una de las hortalizas que acumula mayores niveles de metales pesados, superando la concentración máxima permitida por la norma de la Unión Europea y el Ministerio de Salud y Protección colombiano (Miranda *et al.*, 2008; MinSalud, 2020).

La aplicación de AH ha sido evaluada en diferentes investigaciones sobre su efecto en la acumulación de metales pesados, encontrando que tienen gran capacidad para disminuir

su fitodisponibilidad y absorción, a través de mecanismos de formación de complejos estables con estos elementos en el suelo (Cortés *et al.*, 2016; Meng *et al.*, 2017; Ondrasek *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018).

Esta investigación se realizó con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de ácidos húmicos (AH) extraídos de Leonardita en un suelo Humic Haplustands sembrado con lechuga Batavia, sobre propiedades químicas del suelo, contenido de nutrientes en hojas de lechuga, rendimiento del cultivo, niveles de acumulación de metales pesados en suelo y planta.



# 1. Capítulo 1: Respuesta de un suelo Humic Haplustands a la aplicación de ácidos húmicos extraídos de Leonardita

## 1.1 Resumen

Esta investigación evaluó el efecto de la aplicación de ácidos húmicos (AH) extraídos de Leonardita, sobre el pH, CO, CICE y los contenidos fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), boro (B), hierro (Fe) y zinc (Zn) en un suelo Humic Haplustands de la Sabana de Bogotá. Se empleó un diseño de medidas repetidas asociado a un diseño completamente al azar, con cuatro tratamientos, como factor entre-sujetos: testigo 0 l ha<sup>-1</sup> (T0); 20 l ha<sup>-1</sup> (T20); 40 l ha<sup>-1</sup> (T40) y 60 l ha<sup>-1</sup> (T60), cuatro repeticiones y como componente intra-sujetos dos ciclos de producción. Los datos se analizaron mediante estadística multivariada y univariada. Los resultados mostraron que los AH incrementaron el CO, la CICE, el contenido de K, Zn y de manera parcial (en un solo ciclo) los contenidos de S, Fe, Mn y Cu, siendo el T60 el que logró los mejores resultados. Se concluye que la aplicación de AH extraídos de Leonardita generó efectos positivos sobre la mayoría de los parámetros químicos de suelos evaluados en esta investigación.

**Palabras clave:** abonos orgánicos, Andisol, parámetros edáficos, fertilidad de suelos

## 1.2 Abstract

This research evaluated the effect of the application of humic acids (HA) extracted from Leonardite, on the pH, CO, CICE and the phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sulfur (S), boron (B), iron (Fe) and zinc (Zn) in a Humic Haplustands soil from Sabana de Bogotá. A repeated measures design associated with a completely randomized design, with four treatments, was used as a between-subject factor: control 0 l ha<sup>-1</sup> (T0); 20 l ha<sup>-1</sup> (T20); 40 l ha<sup>-1</sup> (T40) and 60 l ha<sup>-1</sup> (T60), four repetitions and as an intra-

subject component two production cycles. The data were analyzed using multivariate and univariate statistics. The results show that HA increased CO, CICE, content of K, Zn and partially (in a single cycle), contents of S, Fe, Mn and Cu, with T60 the best results. It is concluded that the application of HA extracted from Leonardite generated positive effects on most of the chemical parameters of soils evaluated in this research.

**Keywords:** organic fertilizers, Andisol, edaphic parameters, soil fertility

### 1.3 Introducción

El suelo es un cuerpo natural que está constituido por tres fases (sólida, líquida y gaseosa), la fase sólida está constituida por una fracción mineral y una orgánica, este cuerpo natural es producto de los factores y procesos de formación, cuya función principal es dar soporte y ser un medio ambiente apropiado para el desarrollo de las plantas (Soil Survey Staff, 1999).

Las características edafogénicas que poseen los suelos como cuerpos naturales, permiten identificarlos y clasificarlos para determinar su nivel de evolución y vocación productiva. Los suelos del departamento de Cundinamarca se caracterizan por la complejidad de su relieve y la amplia variación altitudinal, climática, de tipos de vegetación y material parental, siendo esto clave para entender la diversidad de suelos. Lo anterior se resume taxonómicamente en la dominancia de los suelos Inceptisoles que ocupan el 48% del área, seguido de los Entisoles (23%) y los Andisoles (14%) (IGAC, 2000).

La Sabana de Bogotá constituye el sector más bajo de la Altiplanicie Cundiboyacense (2550 m.s.n.m), su límite se encuentra entre las terrazas fluvio-lacustres y planos de inundación de los ríos Bogotá, Frío, Chicú, Subachoque y otros de cauce menor. Todos los materiales inorgánicos a partir de los cuales se desarrollaron los suelos de la Sabana de Bogotá son sedimentos alóctonos, es decir, que corresponden a materiales originados en otros ambientes y que fueron transportados y sedimentados en el ambiente lacustre; este es el caso de las arcillas palustres y las cenizas volcánicas. Los suelos predominantes de la Sabana de Bogotá corresponden al orden Inceptisol, seguidos de los Andisoles y Alfisoles, mientras que los órdenes Mollisol y Entisol se encuentran en muy bajas proporciones (IGAC, 2012).

El suelo en el que se desarrolló la presente investigación es un Andisol (Humic Hapludands), orden que se extiende en cerca de 24.000 hectáreas de la Sabana de Bogotá, son suelos con moderado grado de desarrollo evolutivo, que se han formado a partir de depósitos piroclásticos superficiales no consolidados, esencialmente mantos de ceniza volcánica transportadas y depositadas por eventos eólicos (IGAC, 2012). Los andisoles son suelos con altos contenidos de materia orgánica, sin embargo, debido a sus propiedades edafogenéticas se favorecen la formación de complejos órgano-minerales, que junto a las condiciones climáticas frías conlleva a que sus tasas de mineralización, el reciclaje de nutrientes y la descomposición de la materia orgánica (MO), sea lenta con respecto a otros suelos (Ortiz *et al.*, 2006; Africando *et al.* 2016).

La materia orgánica es reconocida como componente clave de la fertilidad del suelo, porque influye sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Ameri y Tehranifar, 2012; Ciarkowska, 2010). Existen diferentes factores naturales y antropogénicos que influyen en la dinámica de la materia orgánica en el suelo. Dentro de los factores naturales encontramos el clima (temperatura y precipitación), textura del suelo, pH, drenaje y el tipo de cobertura, en los antropogénicos, se incluyen labores de labranza, rotación de cultivos y la aplicación de enmiendas o fertilizantes orgánicos (Paul, 2016).

Los ácidos húmicos (AH) forman parte de la materia orgánica estable o también denominada humus (Schnitzer, 2000; Burbano, 2001) y, normalmente son el resultado del proceso de humificación, desde hace algunos años estas sustancias se han obtenido a partir de procesos de extracción de minerales como la Leonardita, o de la misma materia orgánica para ser empleados como un fertilizante orgánico por parte de los agricultores (Huang *et al.*, 2005). La Leonardita es una forma oxidada de lignitos de carbón, es un material complejo constituido predominantemente de carbono (55%) y materiales húmicos (carboxilos, hidroxilos y carbonilos) (Schwarzenbach *et al.*, 1993; Sugier *et al.*, 2013).

Los AH de Leonardita tienen un efecto positivo en las propiedades químicas del suelo, sin embargo, estos aún no han sido claramente dilucidados (Khaled y Fawy *et al.*, 2011). En Colombia, se ha realizado poca investigación del efecto de ácidos húmicos sobre las características químicas del suelo, una de ellas es la realizada de Mesa *et al.* (1992) donde evaluaron el efecto de la aplicación de AH 12% en un suelo Hapludult típico de los llanos

orientales colombianos. Los resultados mostraron un aumento en la disponibilidad de P, Zn y una disminución en la de Fe, Mn y Cu. La aplicación de este producto, con base en Leonardita, no tuvo efecto en el pH del suelo. En la revisión de literatura realizada hasta la fecha de publicación del presente documento, no se encontraron trabajos realizados sobre investigaciones que evaluaran el efecto de los AH en suelos de la Sabana de Bogotá.

A nivel internacional, la investigación sobre el efecto en el suelo de los AH provenientes de Leonardita ha sido más amplia, como se evidencia a continuación.

Kołodziej *et al.* (2013) llevaron a cabo un experimento en campo para evaluar el efecto de la fertilización orgánica con Leonardita, en otoño y primavera, en las propiedades químicas de dos tipos de suelo (arcilloso y arenoso), sembrados con rodiola (*Rhodiola rosea* L.) El carbono orgánico total, pH y la disponibilidad de nitrato y amonio en el suelo, aumento con la aplicación del AH al 85% sin importar la textura, ni la estación en la que se realizó la siembra.

Sugier *et al.* (2013) evaluaron el efecto de la aplicación de Leonardita con cuatro dosis 0, 2, 4 y 6 kg ha<sup>-1</sup>, usando como fuente AH al 85% sobre las propiedades químicas de un suelo sembrado con *Arnica montana* L. Los resultados mostraron aumento proporcional con la dosis de AH para pH, contenido de CO, amonios y nitratos; con la dosis de 6 kg ha<sup>-1</sup> el pH paso de 4.19 a 5.52, el CO aumentó 0.53 g kg<sup>-1</sup>, amonio y nitrato aumentaron 1.5 veces en comparación al testigo.

Olego *et al.* (2015), evaluaron el efecto de la Leonardita en forma de AH al 40% a dosis de 0.5 y 1.0 t ha<sup>-1</sup> durante tres años, sobre un suelo Inceptisol cultivado con uva (*Vitis vinifera* L.). Los resultados mostraron un aumento directamente proporcional a la dosis, en los contenidos de materia orgánica, Fe, Mn, Cu y Zn.

Ciarkowska *et al.* (2017), realizaron una investigación con el fin evaluar los efectos de los ácidos húmicos derivados de lignito (Act) y estiércol (FYM), en las propiedades de dos tipos de suelos: Cambisol dístico de textura gruesa (arena arcillosa) y Luvisol háplico de textura media (limo). Los tratamientos incluyeron un control sin fertilizantes minerales (NPK), estiércol suplementado con P y K (FYM), fertilización NPK con AH al 6% (Act1) y

NPK con AH al 12% (Act2). La aplicación de estos productos aumento el contenido de AH de la materia orgánica y, mejoró el índice de calidad del suelo denominado SQI, encontrando para el suelo de textura gruesa valores de 0.16 (control), 0.17 (NPK), 0.23 (FYM), 0.25 (Act1) y 0.29 (Act2), en tanto que, para el suelo de textura media, fueron de 0.19 (control), 0.20 (NPK), 0.24 (FYM) hasta 0.25 (Act1) y 0.28 (Act2).

Es importante aclarar que en Colombia el consumo de AH se ha incrementado en los últimos años (ICA, 2019) por lo que, se justifica realizar investigación sobre su efecto en el suelo, por ello se planteó la presente investigación cuyo objetivo fue evaluar el efecto de la aplicación de ácidos húmicos extraídos de Leonardita, sobre las propiedades químicas de un suelo Humic Hapludands de la Sabana de Bogotá.

## 1.4 Materiales y métodos

### 1.4.1 Descripción del sitio

La investigación se llevó a cabo en un área de un cultivo comercial de lechuga ubicada en el municipio de Mosquera, Cundinamarca en las coordenadas 4°41'26.6"N 74°12'31.6"W con una temperatura entre los 13.3 ° C y los 14° C, y una precipitación promedio mensual entre los 16 mm y los 104 mm (IDEAM, 2019).

### 1.4.2 Descripción del suelo

El suelo está clasificado como Humic Haplustands, derivado de mantos de ceniza volcánica sobre depósitos clásticos hidrogénicos, tiene un grado evolutivo moderado (IGAC, 2000; IGAC, 2017), y morfológicamente presenta una distribución de horizontes Ap (0-25 cm), A2 (25-48 cm), Bw1 (48-75 cm), Bw2 (75-93 cm) y C (93- X cm) (Anexo B). El horizonte Ap se caracteriza por tener textura franco-arcillosa, estructura granular y densidad aparente de 0.76 g. cm<sup>3</sup>, algunas de sus características químicas iniciales para cada ciclo se muestran en la tabla 1-1.

**Tabla 1-1:** Análisis químico de suelo inicial para cada ciclo

Parámetro	pH	C.E	C.O	CICE	K Int	Ca Int	Mg Int	Na Int	Fe	Mn	Cu	Zn	B	P	S
Unidad		dS m <sup>-1</sup>	%			cmol kg <sup>-1</sup>						mg kg <sup>-1</sup>			
Ciclo 1	5.8	1.21	4.17	19.95	0.55	14	3.96	1.44	124	69	0.66	86	1.3	157	117
Ciclo 2	5.72	1.67	5.8	21.54	1.07	14.5	4.15	1.82	128	63	0.69	84	1.13	205	138

### 1.4.3 Establecimiento experimental

Se llevaron a cabo dos experimentos, cada uno correspondiente a un ciclo de cultivo de 75 días, el primero de ellos entre los meses de agosto y octubre del 2018; y el segundo entre diciembre de 2018 y febrero de 2019. Se sembró lechuga de la variedad Batavia con una densidad de siembra de 96000 plantas ha<sup>-1</sup>. La fertilización del cultivo se realizó con base a los requerimientos nutricionales (107 kg N ha<sup>-1</sup>, 48 kg P ha<sup>-1</sup>, 102 kg K ha<sup>-1</sup>, 26 kg Ca ha<sup>-1</sup>, 7.5 kg Mg ha<sup>-1</sup>, 3.8 kg S ha<sup>-1</sup> y 0.3 kg B ha<sup>-1</sup>) (Noreña *et al.*, 2014), ajustada con el análisis inicial de suelos (Tabla 1-1) y distribuida en dos aplicaciones, la primera a los 5 ddt y la segunda a los 30 ddt, usando como fertilizante una fuente comercial de mezcla física, de fórmula 12-27-13-2(MgO)-1(S), más urea, sulfato de potasio y nitrato de calcio con boro (15-0-0-26CaO-0.3B). Se realizó aplicación de riego teniendo en cuenta capacidad de campo del suelo. Las demás labores agronómicas (control de malezas, control de plagas y enfermedades) se realizaron de manera similar al cultivo comercial dentro del cual se encontraba el ensayo.

### 1.4.4 Diseño experimental y tratamientos

Se empleó un diseño de medidas repetidas con el componente de factores entre-sujetos asociado a un diseño completamente al azar, con cuatro tratamientos: testigo con 0 l ha<sup>-1</sup> (T0), 20 l ha<sup>-1</sup> (T20), 40 l ha<sup>-1</sup> (T40) y 60 l ha<sup>-1</sup> (T60) y cuatro repeticiones, el ciclo como componente intra-sujetos. Cada repetición correspondió a 625 m<sup>2</sup>. El producto utilizado en el experimento fue un concentrado soluble que aporta 0.696 kg m<sup>-3</sup> de AH extraídos de Leonardita de origen español. Según análisis de composición reportado en etiqueta el producto aporta adicionalmente 0.172 kg m<sup>-3</sup> de K<sub>2</sub>O, 0.9 kg m<sup>-3</sup> de carbono orgánico, 0.07 kg m<sup>-3</sup> de Cu, 0.2 kg m<sup>-3</sup> de Zn, 0.0070 kg m<sup>-3</sup> de Cd, 0.025 kg m<sup>-3</sup> de Ni, 0.045 kg m<sup>-3</sup> de Pb, 0.07 kg m<sup>-3</sup> de Cr y 0.0004 kg m<sup>-3</sup> de Hg. Se realizó una aplicación en drench del producto a los 15 ddt con un volumen de agua de 320 l ha<sup>-1</sup>.

### 1.4.5 Muestreo y análisis de suelos

Para la evaluación de propiedades químicas en el suelo se realizaron cuatro muestreos, uno inicial antes de la aplicación de los tratamientos para cada ciclo cuyos resultados se observan en la Tabla 1, y a los 30, 50 y 70 ddt. Se tomaron muestras de suelo por cada unidad experimental, para un total de 16 muestras por muestreo. Cada muestra correspondió a 500 gramos de suelo tomados a una profundidad entre los 0-20 cm, fueron transportadas en bolsas plásticas y llevadas el mismo día a análisis para el procesamiento colectivo en el laboratorio. Se secaron en horno a una temperatura de 70° C hasta peso constante y se tamizaron en malla 2 mm, para obtener la fracción de tierra fina. Las características químicas del suelo evaluadas, su método de análisis y valoración se muestran en la tabla 1-2.

**Tabla 1-2:** Método de análisis y valoración para cada parámetro del suelo determinado

<b>Parámetro</b>	<b>Método de análisis y valoración</b>
pH	Pasta de saturación- Potenciométrica
Carbono Orgánico	Walkley Black- Colorimétrico
CICE	Cálculo matemático por suma de cationes
Ca- Mg- K	Acetato de amonio- Absorción atómica
P	Bray II- Colorimétrico
S	CaH <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>8</sub> - Turbidimétrico
B	CaH <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>8</sub> - Colorimétrico
Fe- Cu- Mn- Zn	Melich I- Absorción atómica

### 1.4.6 Análisis estadístico y procesamiento de datos

Se obtuvieron promedios para cada una de las respuestas en cada nivel de los factores inter e intra-sujetos para los contenidos de los elementos en suelo. Las variables determinadas para el suelo se analizaron empleando un análisis univariado y multivariado, este último, ajustado a partir de un diseño de medidas repetidas, usando el tratamiento como el factor entre sujetos y el ciclo como factor intra-sujetos. Estos resultados se complementaron con un análisis de perfiles, una técnica de estadística multivariante que es equivalente al análisis multivariado de varianza (MANOVA) para tratamientos con medidas repetidas (Bulut y Desjardins, 2018).

Los datos fueron procesados por el programa SAS University Edition (SAS Institute, Inc.) para el análisis univariado y multivariante. El software R se utilizó para el análisis de perfiles.

## 1.5 Resultados y discusión

### 1.5.1 Propiedades químicas del suelo (pH, CO y CICE)

- **pH**

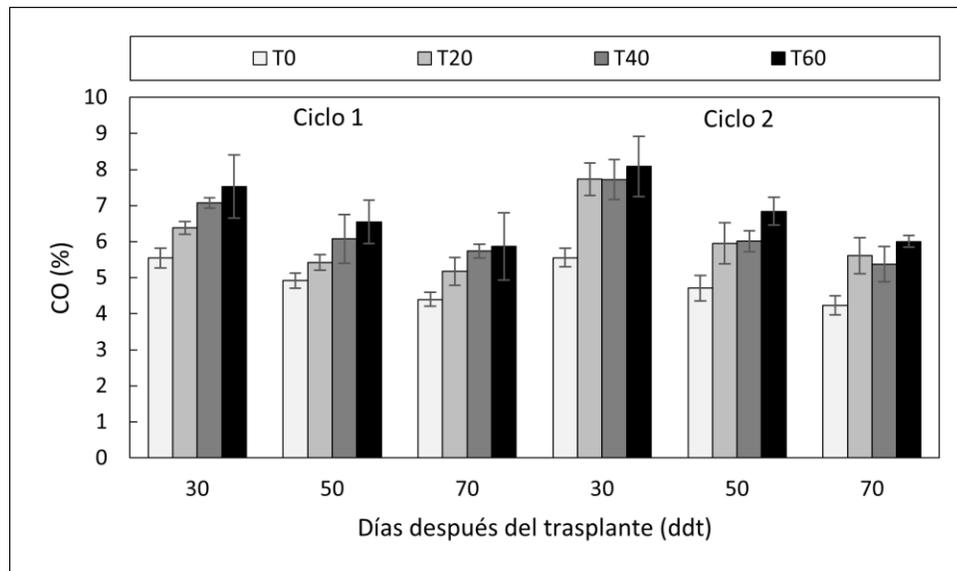
El pH promedio del suelo para el primer ciclo fue de 5.63 y de 5.66 para el segundo ciclo. El análisis de perfiles no evidenció efecto de la interacción tiempo-tratamiento ni diferencia de tratamientos, que se comprobó con el análisis univariado donde no se mostró efecto significativo de los tratamientos para pH en el suelo en ninguno de los ciclos, resultados que concuerdan con lo encontrado por Ece *et al.*, (2007) quienes con la aplicación de Leonardita complementada con nutrición mineral a dosis de 10 y 20 Mg ha<sup>-1</sup> no encontraron efecto significativo sobre pH del suelo.

Variaciones del pH del suelo por efecto de la aplicación de AH extraídos de Leonardita, han sido reportadas por otros autores (Kołodziej *et al.*, 2013; Sugier *et al.*, 2013; Akimbekov, 2020), sin embargo, la causa probable de que este efecto no se encontrará en esta investigación, es que, los Andisoles son suelos que poseen alto poder buffer debido a su alta capacidad de intercambio catiónico y al elevado valor de las cargas dependientes del pH (Sanchez y Rubiano, 2015), debido a sus altos contenidos de materia orgánica (Acosta *et al.*, 2020), por lo que, se requieren altos aportes de ácidos o bases para producir un cambio en el valor del pH.

- **Carbono orgánico**

El análisis de perfiles mostró diferencia de tratamientos sin interacción tiempo-tratamiento para el contenido de CO del suelo en ambos ciclos, lo que justifico un análisis de tipo univariante.

El análisis mostró efecto significativo de los tratamientos ( $p < 0.05$ ) para CO en el suelo en ambos ciclos (Figura 1-1). Para el primer ciclo, no se dieron diferencias entre T40 y T60, pero sí, de estos con los demás tratamientos y de T0 con T20, con valores promedios de 4.95%, 5.66%, 6.29% y 6.64% para T0, T20, T40 y T60, respectivamente. Para el segundo ciclo, se dieron diferencias entre todos los tratamientos excepto entre T20 y T40, con valores promedios de 4.83%, 6.43%, 6.36% y 6.97% para T0, T20, T40 y T60, respectivamente.



**Figura 1-1:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de CO en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

La aplicación de AH aumentó el contenido de CO del suelo, siendo T60 el que logró mayores valores (7.52% para el ciclo 1 y 8.08% para el ciclo 2), resultados que concuerdan con lo reportado por otros autores como Ece *et al.*, (2007), Sugier *et al.*, (2013), Olego *et al.* (2015) y Wang *et al.*, (2020) quienes encontraron que el CO aumentó proporcionalmente con la dosis de Leonardita aplicada.

Por otro lado, se observa un efecto acumulativo de la aplicación de AH extraídos de Leonardita sobre el CO del suelo, dado que, el CO promedio para el primer ciclo fue de 5.89% y de 6.15% para el segundo ciclo, lo cual puede ser condicionado por la fracción húmica, la que proporciona un efecto más estable en el tiempo que la fracción lábil a causa de la mayor dificultad para ser metabolizada por los microorganismos del suelo (Lejon *et al.*, 2007) y de forma específica, en el suelo Andisol en el que se llevó a cabo esta investigación, esta condición de acumulación puede deberse a que la materia orgánica está estabilizada por minerales con ordenación de corto alcance, por ejemplo, la fracción alofánica posee una elevada superficie específica con carga variable que le permite adsorber moléculas orgánicas, propiciando que el CO sea altamente resistente al ataque microbiano (Parfitt *et al.*, 1997).

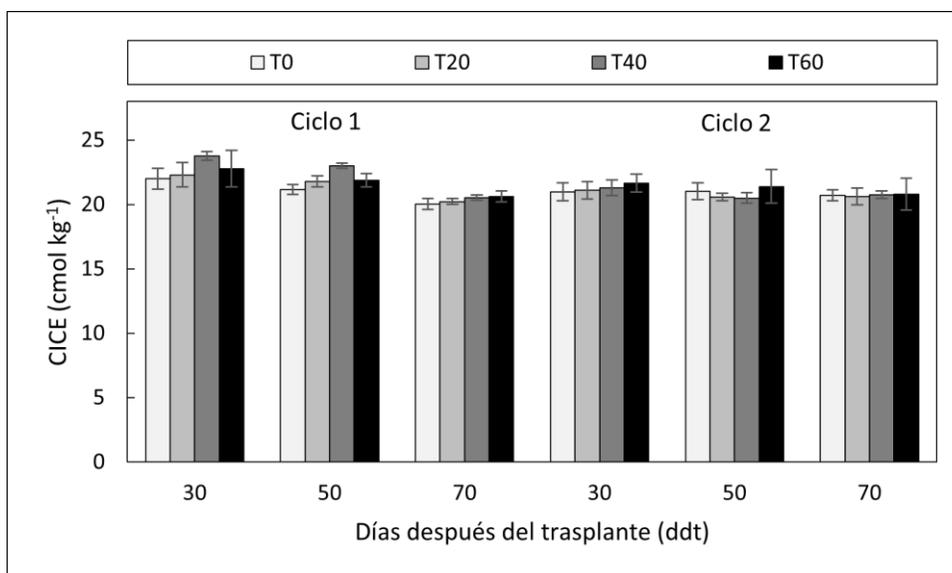
Otro factor que pudo incidir en la acumulación de CO en el presente ensayo es la estructura granular migajosa del Andisol estudiado, en razón a que favorece la formación de

complejos órgano-minerales y protege físicamente el CO de la mineralización microbiana (Rodríguez *et al.*, 2004).

#### ▪ CICE

El análisis de perfiles mostró diferencia de tratamientos para la CICE en ambos ciclos, por lo que, se realizó un análisis de tipo univariante.

En la figura 1-2 se muestra el efecto de la aplicación de los AH sobre la CICE. El análisis mostró efecto significativo de los tratamientos ( $p < 0.05$ ) para el primer ciclo, pero no para el segundo. Para el primer ciclo, las diferencias entre tratamientos fueron para T0 (21.06  $\text{cmol kg}^{-1}$ ) con T40 (22.42  $\text{cmol kg}^{-1}$ ), T0 con T60 (21.76  $\text{cmol kg}^{-1}$ ) y T20 (21.43  $\text{cmol kg}^{-1}$ ) con T40. La tendencia de los tratamientos con AH para el segundo ciclo indican mejor respuesta de T60.



**Figura 1-2:** Efecto de los tratamientos con AH sobre la CICE en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

La CICE es calculada a partir de la suma de los cationes Ca, Mg, K, Na y Al (FAO, 2008), en este caso, el aumento de esta variable con la aplicación de los AH (solo significativo para el primer ciclo) se debe principalmente al aumento en el contenido de K.

### 1.5.2 Contenido de nutrientes en el suelo (P, K, Ca, Mg, S, B, Fe, Zn, Cu y Mn)

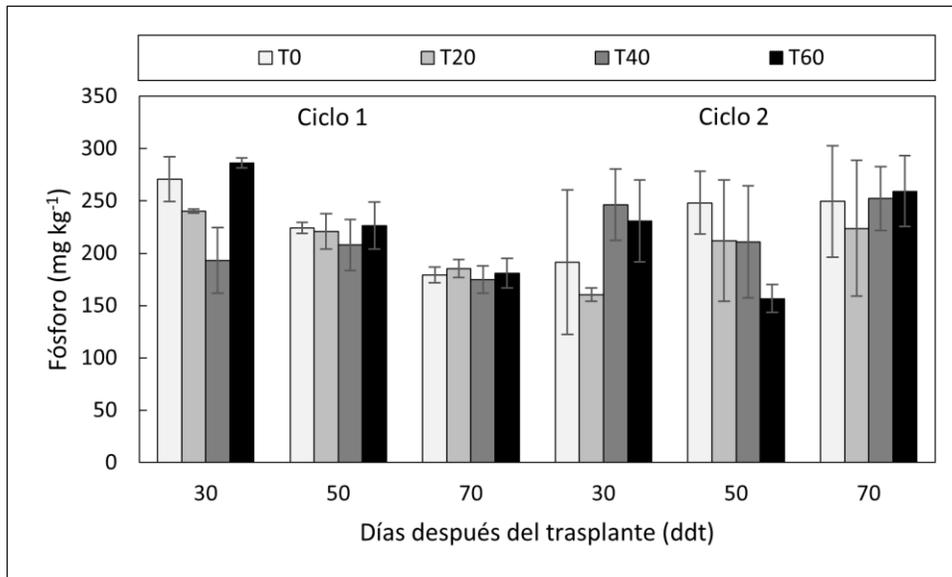
El efecto de la aplicación de AH extraídos de Leonardita sobre el contenido de nutrientes en el suelo, se fundamenta principalmente en que estos tienen una alta concentración de grupos carboxilo y grupos hidroxilo fenólicos, que tienden a formar complejos estables con estos elementos (Tan, 2014). El comportamiento de complejación de fracciones de AH depende de la calidad y cantidad de grupos funcionales y también del tipo de ion. En la formación del complejo, el agente complejante actúa como donador de electrones, mientras que el ion nutriente actúa como aceptor de electrones, en el que el elemento puede formar un puente entre la arcilla y el radical orgánico, como en los complejos de arcilla-metal-orgánicos o puede establecer directamente un vínculo con el grupo funcional del AH (Eshwar *et. al*, 2017).

#### ▪ Contenido de fósforo

El análisis de perfiles mostro interacción tiempo-tratamiento para el primer ciclo e igualdad de tratamientos sin efecto tiempo para el segundo ciclo para el contenido de P en el suelo.

En la figura 1-3 se muestra el efecto de la aplicación de los AH en el contenido de P en el suelo. En ninguno de los dos ciclos se observa una tendencia clara del efecto de la aplicación de los AH, ya que, por ejemplo, para el primer ciclo, donde se dieron diferencias estadísticamente significativas a los 30 ddt, el contenido de P en orden de mayor a menor fue T60, T0, T20 y T40. El análisis multivariado realizado para el primer ciclo mostró diferencias significativas, en el muestreo a los 30 ddt, para el T0 (270.75 mg P kg<sup>-1</sup>) con T40 (193.25 mg P kg<sup>-1</sup>), T20 (240.25 mg P kg<sup>-1</sup>) con T40, T20 con T60 (286 mg P kg<sup>-1</sup>) y T40 con T60. Como se observa, no se encontró diferencia estadística entre T0 y T60.

Los resultados encontrados para el contenido de P para el muestreo a los 30 ddt en el primer ciclo pueden deberse a que la adición de Leonardita, según lo reportado por Wang *et al.* (2020), puede disminuir el fósforo soluble, promoviendo su retención (reduciendo lixiviación) y su disponibilidad para el cultivo, dado que, la aplicación de Leonardita al suelo aumenta la actividad de la enzima fosfatasa provocando la mineralización del fósforo orgánico y la solubilización del fósforo inorgánico fijado.



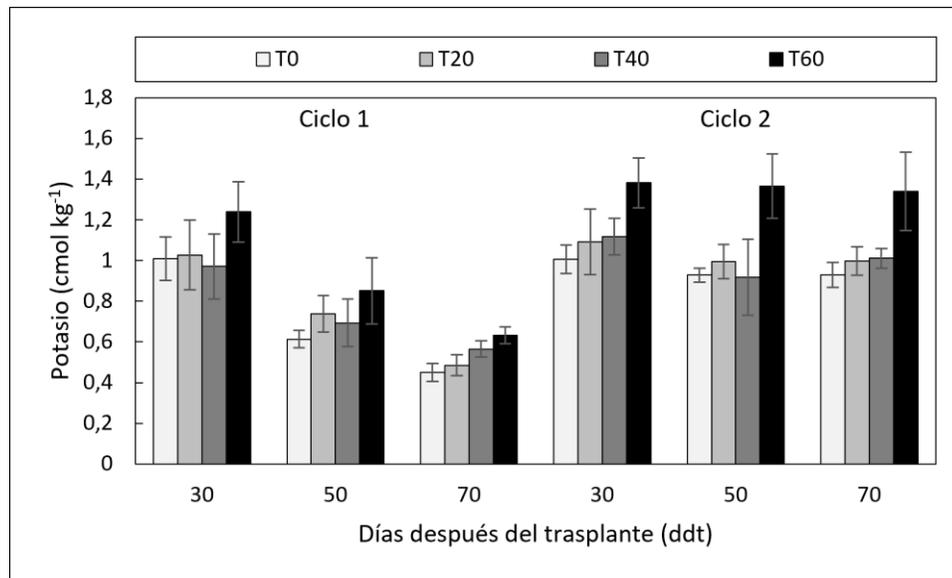
**Figura 1-3:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de P en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

Los Andisoles son altamente fijadores de fósforo debido a la alta presencia de la alófana en la fracción coloidal, como resultado de la meteorización de la ceniza volcánica. En suelos Andisoles de Colombia y Ecuador, se puede concluir que la fijación de P está estrechamente relacionada con los contenidos de carbono en estos suelos (Ospina, 1974; Espinosa, 1996). Esta característica de los Andisoles para la presente investigación pudo afectar la respuesta de la movilidad del P por la aplicación de AH extraídos de Leonardita

#### ▪ Contenido de potasio

El análisis de perfiles mostró efecto de los tratamientos sin interacción tiempo-tratamiento en ambos ciclos para el contenido de K en el suelo, justificando la realización del análisis univariante.

Se observa en la figura 1-4, que T60 presentó los mayores contenidos de K para ambos ciclos y en todos los muestreos, con un incremento del 31.38 y 42.72%, en comparación a T0, para ciclo 1 y ciclo 2 respectivamente. El análisis mostró efecto significativo de los tratamientos ( $p < 0.05$ ) para el contenido de K en el suelo para los dos ciclos, y diferencias de T60 con los demás tratamientos.



**Figura 1-4:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de K en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

En la figura 1-4 se evidencia para los dos ciclos, una reducción en el contenido de K por época de muestreo y tratamiento, siendo esta menor para el segundo ciclo. La reducción del K intercambiable entre los muestreos del primer ciclo se debe a la absorción que la planta ha hecho de este nutriente (Grime, 1985; Henao y Hernández, 2002). Otro factor importante que determina la capacidad de suministro de K en el suelo es el contenido de agua (Grime, 1985) que pudo afectar su comportamiento en el segundo ciclo. Para el primer ciclo el promedio de precipitación mensual fue de 42.65 m.m., mientras que, para el segundo fue de 29.62 mm, siendo enero uno de los meses que presentó menores lluvias en el segundo ciclo (0.4 mm).

Es importante tener en cuenta que, el método comercial clásico utilizado para separar AH del mineral Leonardita, emplea la lixiviación alcalina con disolventes como KOH (Saito y Seckler, 2014), base utilizada para la extracción de los AH usados en la presente investigación, por lo que, se infiere que el incremento de K en el suelo pudo ser influenciado por el aporte de este elemento de los AH y por supuesto el realizado en forma de fertilizante.

- **Contenido de calcio y magnesio**

Para estas variables, no se evidenció efecto de la interacción tiempo-tratamiento, ni de tratamientos, a excepción del Ca para el primer ciclo entre T0 (14.15 cmol Ca kg<sup>-1</sup>) y T40 (14.69 cmol Ca kg<sup>-1</sup>).

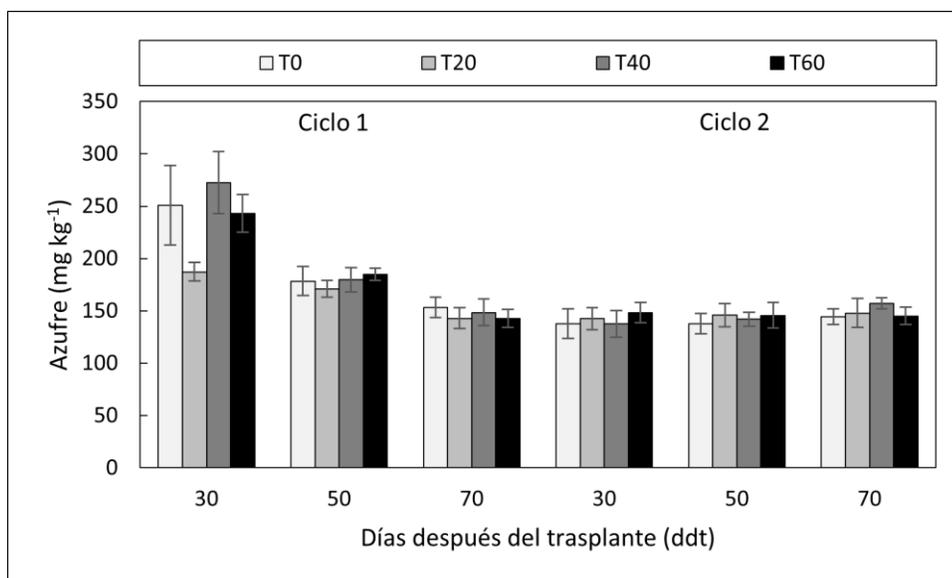
Los resultados encontrados para la presente investigación no muestran una tendencia clara de los tratamientos sobre los contenidos de estos dos nutrientes en suelo. El contenido de Ca para ambos ciclos varió entre 13.93 y 15.07 cmol kg<sup>-1</sup>, mientras que, el rango para el Mg fue entre 3.65 y 4.74 cmol kg<sup>-1</sup>.

Se esperaba que la formación de complejos AH- Ca se favoreciera, por el alto contenido Ca en el suelo, pero los resultados evidenciaron baja formación de estos complejos, lo que pudo deberse a la condición ácida del suelo, en razón a que son dependientes del pH, como lo afirma Kloster *et al.*, (2013), así mismo, Balouousha *et al.* (2006) mostraron que a un pH de 4.5, donde los grupos funcionales están débilmente disociados y la carga negativa de AH es baja, hay un menor efecto de la concentración de Ca en la agregación con AH, contrario a lo que sucede en suelos con pH básicos.

#### ▪ Contenido de azufre

Para esta variable, el análisis de perfiles mostró solo efecto de los tratamientos para el primer ciclo, respuesta que unida al análisis univariado evidencia diferencias significativas entre T20 (167.08 mg S kg<sup>-1</sup>) con los demás tratamientos y valores promedio de 194.25 mg S kg<sup>-1</sup>, 200.25 mg S kg<sup>-1</sup> y 190.25 mg S kg<sup>-1</sup> para T0, T40 y T60, respectivamente. En la figura 1-5 se aprecia una disminución gradual del efecto de los tratamientos, sobre el contenido de S entre el primero y el tercer muestreo, efecto que no se aprecia para el segundo ciclo, donde no hubo diferencia significativa entre tratamientos y entre muestreos. En el primer ciclo, el rango de variación para el contenido de S fue de 142.75 a 272.5 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que, para el segundo ciclo fue de 137.5 a 157.25 mg S kg<sup>-1</sup>.

En el primer ciclo, se evidencia la tendencia de T0 a presentar niveles de acumulación de S muy cercanos a los de T40 y T60, incluso, llegando a superar en el tercer muestreo de dicho ciclo a los tratamientos mencionados. Para el segundo ciclo, se mantiene la tendencia de valores cercanos en todos los muestreos, pero con un leve incremento de los tratamientos con AH respecto al testigo (Figura 1-5), efecto atribuible a los cambios en niveles de precipitación entre ciclos.



**Figura 1-5:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de S en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

Este elemento se encuentra en ligandos de los grupos funcionales de las sustancias húmicas y se ha demostrado que juegan un papel importante en la complejación de ciertos metales traza como Cd, Co, Ni, Pb, y Hg (Xia *et al.*, 1999; Reich y Bernhard, 2010). Olivella *et al.* (2001) demostraron que el S oxidado, como sulfonato y sulfato, representan las principales formas en que se encuentra este elemento en la Leonardita, y, posiblemente, de esta manera se realizó un aporte al contenido inicial en el suelo, que pudo incidir sobre el acomplejamiento de metales pesados en la presente investigación.

#### ▪ Contenido de boro

El análisis de perfiles mostró igualdad de los tratamientos sin efecto tiempo para el contenido de B en el suelo para ambos ciclos. El rango de variación del contenido de B en el suelo fue de 1.37 a 1.9 mg kg<sup>-1</sup> para el primer ciclo y entre 1.18 a 1.28 mg kg<sup>-1</sup> para el segundo ciclo.

Los resultados mencionados pudieron deberse a que el ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) encontrado en el suelo, no está cargado y responde de manera diferente a la variación de la fuerza iónica y al tipo de iones que normalmente se encuentran disponibles para la adsorción a AH. Esta interacción de una especie neutra con moléculas de AH cargadas, se da sin la influencia directa del campo electrostático, en contraste con la adsorción de protones e iones metálicos (Goli *et al.*, 2019).

Por otro lado, Goli *et al.*, (2019) determinaron que la interacción química del  $H_3BO_3$  con grupos funcionales de HA aumenta con el incremento del pH, por lo que, el pH ácido del suelo en estudio pudo ser uno de los factores que limitó el efecto de la aplicación de AH en el contenido B.

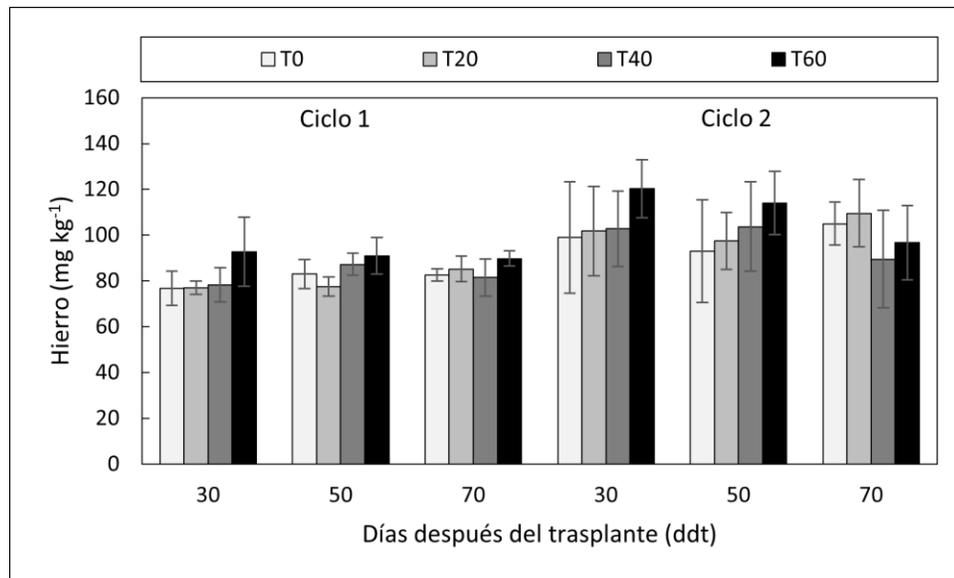
#### ▪ **Contenido de hierro**

El análisis de perfiles mostró diferencia de tratamientos sin efecto del tiempo para el contenido de Fe en el primer ciclo, mientras que, para el segundo se dio igualdad de tratamientos.

En la figura 1-6 se muestra el efecto de la aplicación de los AH en el contenido de Fe en el suelo. El análisis univariado mostró efecto significativo de los tratamientos ( $p < 0.05$ ) para el contenido de Fe en el suelo en el primer ciclo, con diferencias entre el T60 ( $91.16 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y los demás tratamientos, con valores promedio de  $80.73$ ,  $79.9$  y  $82.35 \text{ mg kg}^{-1}$  para T0, T20 y T40 respectivamente. Los contenidos de Fe en el suelo para T60 en las tres épocas de muestreo, fueron  $20.92\%$ ,  $9.6\%$  y  $8.7\%$  respectivamente, valores mayores a los encontrados para T0 en los mismos muestreos.

Los resultados encontrados en el primer ciclo concuerdan con lo reportado por Olego *et al.* (2015) quienes con la aplicación de Leonardita a una dosis de  $0.5 \text{ t ha}^{-1}$ , incrementaron el contenido de Fe en el suelo.

Una fracción importante de este elemento en el suelo está representada por los complejos de Fe insolubles con sustancias húmicas, su complejación se atribuye a los grupos funcionales que contienen oxígeno (carboxílico, fenólico y carbonilo) y, en menor medida a los que contienen N o S (Evangelou y Marsí, 2001). Este Fe puede volverse soluble desplazando moléculas húmicas a través de un mecanismo de intercambio de ligandos, que pueden favorecer los procesos de absorción de elementos por parte de la planta (Stevenson, 1994; Nuzzo *et al.*, 2018).



**Figura 1-6:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Fe en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

Los resultados encontrados en el primer ciclo concuerdan con lo reportado por Olego *et al.* (2015) quienes con la aplicación de Leonardita a una dosis de  $0.5 \text{ t ha}^{-1}$ , incrementaron el contenido de Fe en el suelo.

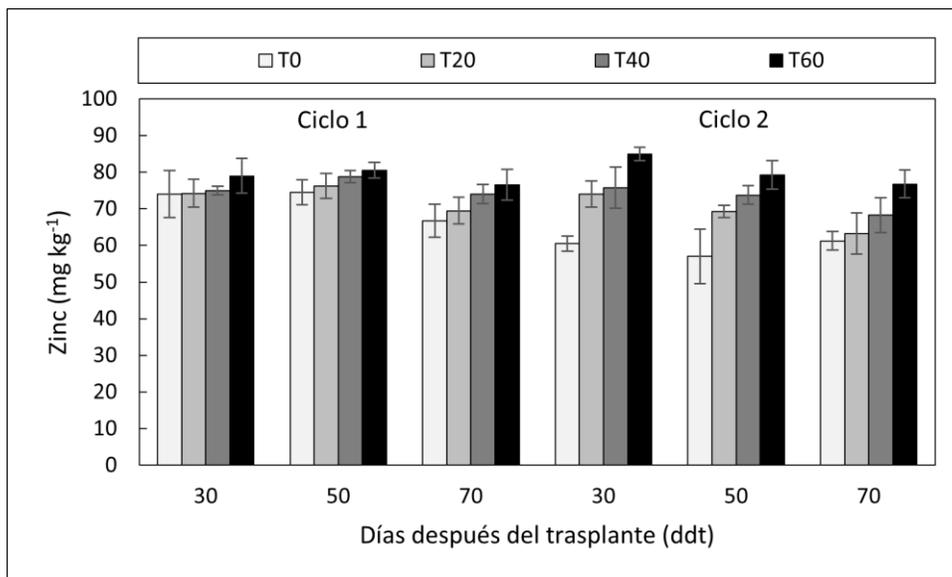
Una fracción importante de este elemento en el suelo está representada por los complejos de Fe insolubles con sustancias húmicas, su complejación se atribuye a los grupos funcionales que contienen oxígeno (carboxílico, fenólico y carbonilo) y, en menor medida a los que contienen N o S (Evangelou y Marsí, 2001). Este Fe puede volverse soluble desplazando moléculas húmicas a través de un mecanismo de intercambio de ligandos, que pueden favorecer los procesos de absorción de elementos por parte de la planta (Stevenson, 1994; Nuzzo *et al.*, 2018).

#### ▪ Contenido de zinc

El análisis de perfiles evidenció la diferencia de tratamientos sin efecto tiempo en el contenido de Zn en el suelo para ambos ciclos, por lo cual, se realizó un análisis de tipo univariante.

El análisis univariado mostró efecto significativo de los tratamientos ( $p < 0.05$ ) para el contenido de Zn en el suelo para ambos ciclos. En el primer ciclo, las diferencias significativamente estadísticas se dieron entre T0 ( $71.75 \text{ mg kg}^{-1}$ ) con T40 ( $75.91 \text{ mg Zn}$

kg<sup>-1</sup>), T0 con T60 (78.66 mg kg<sup>-1</sup>) y T20 (73.33 mg kg<sup>-1</sup>) con T60, mientras que, para el segundo ciclo, esta diferencia no se dio entre el T20 y el T40 pero si entre los demás tratamientos, con valores promedio de 59.58, 68.83, 72.58 y 80.33 mg kg<sup>-1</sup> para T0, T20, T40 y T60 respectivamente.



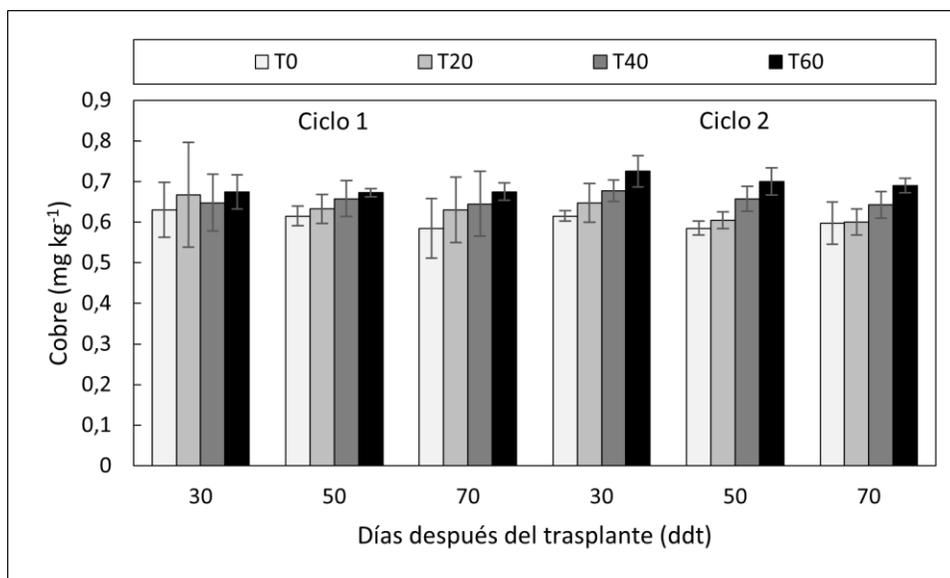
**Figura 1-7:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Zn en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

Katanyoo *et al.*, (2012) demostraron que la mejor adsorción de Zn por parte de la Leonardita, se obtiene en rangos de pH entre 5 y 6, por lo cual, se puede afirmar que las condiciones de pH del suelo en ambos ciclos (5.8 para el ciclo 1 y 5.72 para el ciclo 2) favorecieron que el efecto de la aplicación de AH sobre el contenido del Zn, mostrará incremento con el aumento de la dosis como se observa en la figura 1-7. Por otro lado, Sumitra *et al.* (2015) determinaron que los complejos Zn-AH son más estables que los de Cu-AH.

#### ▪ Contenido de cobre

El análisis univariado empleado para la presente variable, se ejecutó en razón a que el análisis de perfiles evidenció la igualdad de tratamientos sin efecto tiempo para su contenido en el suelo en el ciclo 1, mientras que, para el ciclo 2 se dio diferencia de tratamientos sin efecto tiempo, sin diferencia entre el T0 y el T20 pero sí entre los demás

tratamientos, con valores promedio de 0.59, 0.61, 0.65 y 0.70 mg kg<sup>-1</sup> para T0, T20, T40 y T60.



**Figura 1-8:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Cu en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

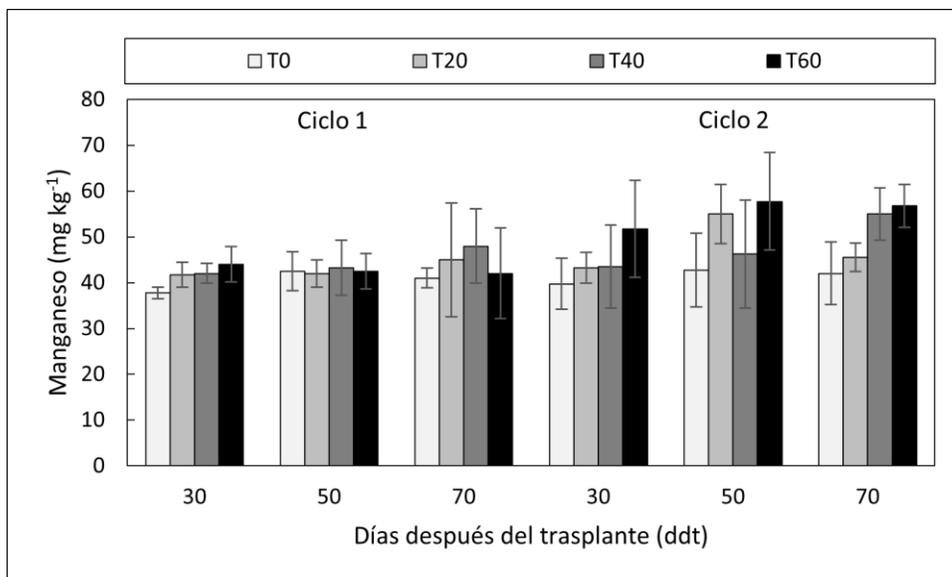
Se evidencia en la figura 1-8 que T60 obtuvo los mayores contenidos de Cu en el suelo para ambos ciclos y en todos los muestreos, comportamiento que también fue reportado por Nannoni *et al.* (2011) quienes indicaron que los AH, inducen la retención de este metal en la matriz del suelo, disminuyendo significativamente su movilidad, efecto también reportado por Cortés *et al.* (2016), quienes encontraron una reducción significativa y constante del elemento en la medida que se incrementó la dosis de AH en un suelo Typic Melanudand de Colombia. Estos resultados pueden ser explicados, en razón, a que el Cu muestra gran capacidad de complejación orgánica con los AH (Logan *et al.*, 1997).

#### ▪ Contenido de manganeso

El análisis de perfiles mostró igualdad de tratamientos sin efecto tiempo para el primer ciclo y en el segundo ciclo mostró diferencia de tratamientos sin interacción tiempo-tratamiento, por lo que, se analizó de modo univariante.

El análisis mostró efecto significativo de los tratamientos ( $p < 0.05$ ) para el contenido de Mn en el suelo en el segundo ciclo, con diferencias significativas entre el T0 (41.5 mg kg<sup>-1</sup>) y el T60 (55.41 mg kg<sup>-1</sup>), comprobando el análisis de perfiles realizado para la presente

variable. El contenido de Mn en el suelo por muestreo en el ciclo 2, para el T60 fue 30.18, 35.08 y 35.11% respectivamente, mayor en comparación con T0 (Figura 1-9).



**Figura 1-9:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Mn en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

Los resultados encontrados en el segundo ciclo concuerdan con lo reportado por Olego *et al.* (2015) quienes con la aplicación de Leonardita a una dosis de  $1 \text{ t ha}^{-1}$ , incrementaron las concentraciones de Mn en el suelo. Dovlati (2018) demostró que la Leonardita puede cambiar las formas químicas de los elementos para mejorar la adsorción de nutrientes para las plantas, obteniendo aumentos en la disponibilidad de Mn proporcionales a la dosis usada.

## 1.6 Conclusión

La aplicación de AH extraídos de Leonardita sobre un suelo Humic Hapludands de la Sabana de Bogotá, mostró aumentos en la mayoría de los parámetros químicos evaluados evidenciándose mejora de la fertilidad del suelo, principalmente en la disponibilidad de nutrientes y el aumento de carbono orgánico en el suelo.

## 1.7 Bibliografía

Acosta, D. F., Camacho, Y. M., López, C. A., Cely, G. E., y Serrano, P. 2020. Transformación electroquímica de un andisol en relación con la dinámica del fósforo. *Rev. Bio. Agro*, vol. 18, no. 2, Popayán jul./dic. 2020. DOI: [http://dx.doi.org/10.18684/bsaa\(18\)94-102](http://dx.doi.org/10.18684/bsaa(18)94-102)

Africano, K., Cely, G., y Serrano, P. 2016. Potencial de Captura de CO<sub>2</sub> asociado al componente edáfico en páramos Guantiva-La Rusia, departamento de Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 21(1), 91-110. DOI: <https://doi.org/10.19053/01233769.4572>

Akimbekov, N., Qiao, X., Digel, I., Abdieva, G., Ualieva, P., y Zhubanova, A. 2020. The Effect of Leonardite-Derived Amendments on Soil Microbiome Structure and Potato Yield. *Agriculture* 2020, 10(5), 147. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10050147>

Ameri, A., y Tehranifar, A. J. 2012. Effect of humic on nutrient uptake and physiological characteristic *Fragaria ananassa* var. Camarosa. *J. Biol. Environ. Sci.* 6 (16), 77-79. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1049.54>

Baloousha, M., Motelica-Heino, M., y Le Coustumer, P. 2006. Conformation and size of humic substances: effects of major cation concentration and type, pH, salinity, and residence time, *Colloids Surf., A* 272 (2006) 48–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.07.010>

Bulut, O, y Desjardins, C. D. 2018. Profile R: Profile Analysis of Multivariate Data in R. R Package Versión 0.3-5. Consultado: 15/10/2020. En: <https://CRAN.R-project.org/package=profileR>

Burbano O. H. 2001. Lo biorgánico en el manejo productivo del suelo- Manejo productivo de los suelos para cultivos de alto rendimiento. (Palmira), Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, comité regional Valle del Cauca, 2001. p 109- 128.

Ciarkowska, K., Solek- Podwickaa, K., Filipek- Mazur, B. y Tabak, M. 2017. Comparative effects of lignite-derived humic acids and FYM on soil properties and vegetable yield. *Geoderma* 303 (2017) 85-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.022>.

Cortés, L. E, Bravo, I. del S., Martín, F. J., y Menjivar, J. C. 2016. Extracción secuencial de metales pesados en dos suelos contaminados (Andisol y Vertisol) enmendados con ácidos húmicos. *Acta Agron.* (2016) 65(3) p 232-238. DOI: [doi: http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n3.44485](http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n3.44485)

Dovlati, B. 2018. Distribution of Manganese Chemical Forms and its Relationship to the Availability of Plants Affected by Leonardite. *Electronic Journal of Soil Management and Sustainable Production* 2018, Vol. 8, No. 3; pp. 1- 20. DOI: <https://doi.org/10.22069/EJSMS.2018.14559.1799>

Ece, A., Saltali, K., Erygit, N. y Uysal, F. 2007. The effects of Leonardite Applications on Climbing Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield and the some soil properties. *Journal of Agronomy* 6(3): 480- 483, 2007. ISSN 1812-5379. DOI: <http://dx.doi.org/10.3923/ja.2007.480.483>

Espinosa, J. 1996. Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica (Informaciones Agronómicas N.º 23). Quito, Ecuador: Instituto de la potasa y el fósforo (Inpofos).

Eshwar, M., Srilatha, M., Rekha, K. B., y Kumar, S. H. 2017. Complexation Behavior of Humic and Fulvic Acids with Metal Ions and their Assessment by Stability Constants. *International Journal of pure & applied bioscience*. DOI: <http://dx.doi.org/10.18782>

Evangelou, V. P., Marsí, M. 2001. Composition and metal ion complexation behaviour of humic fractions derived from corn tissue. *Plant Soil*. 2001; 229:13–24. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004862100925>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2008. Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. Consultado: 09/11/2020. En: <http://www.fao.org/3/a-a0510s.pdf>

Goli, E., Hiemstra, T., y Rahnemaie, R. 2019. Interaction of boron with humic acid and natural organic matter: Experiments and modeling. *Chemical Geology Volume 515*, 20 June 2019, Pages 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.03.021>

Grimme, H. 1985. The dynamics of potassium in the soilplant system. In: *Potassium in the agricultural systems of the humid tropics*. Bangkok, International Potash Institute, 1985. p. 127-154.

Henao T., M. C., y Hernández G. E. 2002. Disponibilidad de potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con la nutrición del café en la etapa vegetativa. *Cenicafé* 53(4):293- 305. 2002. Consultado: 14/11/2020. En: <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc053%2804%29293-305.pdf>

Huang, P.; Kuang, M.; Chih, C. H. 2005. Soil mineral organic matter microbe interactions: Impacts on biogeochemical processes and biodiversity in soils. *Pedobiology* 49(6):539–547, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.06.006>

ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 2019. Comercialización de fertilizantes y acondicionadores de suelos 2015. Fecha de consulta: 05 de mayo de 2020. Disponible en: <https://www.ica.gov.co/Areas/Agricola/Servicios/Fertilizantes-y-Bio-insumos-Agricolas/Estadisticas/Estadisticas-Fertilizantes-2015-22-12-2016-2.aspx>.

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2019. Datos de temperatura y precipitación- Estación Tibaitata, Mosquera, Cundinamarca.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), 2000. Estudio General de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Cundinamarca- Tomo II.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), 2012. Levantamiento detallado de suelos en las áreas planas de 14 municipios de la Sabana de Bogotá- Departamento de Cundinamarca- Escala 1:10.000.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2017. Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Cundinamarca.

Katanyoo, S., Naksata, W., Sppksamiti, P., Thiansem, S., y Arquero, O. A. 2012. Adsorption of Zinc Ion on Leonardite prepared from Coal Waste. OJCHEG 2012, Vol. 28, No. (1), p 373-378. DOI: <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/280147>

Khaled, H., y Fawy, H. 2011. Effect of different level of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity. Soil & Water Res., 6, 2011 (1): 21–29. DOI: <https://doi.org/10.17221/4/2010-SWR>.

Kloster, N., Brigante, M., Zanini, G., y Avena, M. 2013. Aggregation kinetics of humic acids in the presence of calcium ions. Colloids and Surfaces A; Physicochem. Eng. Aspects 427 (2013) 76-82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.03.030>

Kołodziej, B., Sugier, D y Bielińska, E. The effect of leonardite application and various plantation modalities on yielding and quality of roseroot (*Rhodiola rosea* L.) and soil enzymatic activity. Journal of Geochemical Exploration 129 (2013) 64-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.014>.

Lejon, D. P. H., Sebastia, J., Lamy, I., Chaussod, R., Ranjard, L. 2007. Relationships between soil organic status and microbial community density and genetic structure in two agricultural soils submitted to various types of organic management. Microbial Ecology 53: 650-663. Consultado: 11/11/2020. En: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7400565>

Logan EM, Pulford ID, Cook GT, Mackenzie AB (1997). Complexation of Cu<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> by peat and humic acid. Eurasian Journal of Soil Science 48: 685-696. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00568.x>

Mesa, L. J., Castro, J., y Méndez, P. 1992. Efecto de la aplicación de ácidos húmicos en Hapludult Típico de los llanos orientales y su interacción con elementos micronutrientes. Agronomía Colombiana. 1992. Volumen 9: 160-178.

Nannoni, F. Protano, G. & Riccobono, F. (2011). Fractionation and geochemical mobility of heavy elements in soils of a mining area in northern Kosovo. Geoderma, 161(1-2), 63 - 73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.008>

Noreña, J. J., Aguilar, P. A., Espitia, E. M., Tamayo, P. J., Arguello, O., y Arroyave, M. 2014. Modelo tecnológico para el cultivo de lechuga en el Oriente Antioqueño. Corporación

Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Consultada: 07/06/2020 En: [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13758/75472\\_65800.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13758/75472_65800.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Nuzzo, A., De Martino, A., Di Meo, V., & Piccolo, A. 2018. Potential alteration of iron-humate complexes by plant root exudates and microbial siderophores. *Chem. Biol. Technol. Agric.* (2018) 5:19. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-018-0132-1>

Olego, M.A, Cordero, J., Quiroga, M. J., Sánchez-García, M., Álvarez, J. C., y Garzón-Jimeno, E. 2015. Efecto de la incorporación de leonardita en el nivel de materia orgánica y micronutrientes en un suelo inceptisol dedicado a viña (*Vitis vinífera* L.). *ITEA* (2015), Vol. 111 (3), 2010- 226. Consultado: 02/11/2020. En: [https://www.researchgate.net/publication/292398547\\_Effect\\_of\\_leonardite\\_application\\_on\\_soil\\_organic\\_matter\\_and\\_micronutrient\\_levels\\_in\\_an\\_inceptisol\\_soil\\_cultivated\\_with\\_vine\\_Vitis\\_vinifera\\_L](https://www.researchgate.net/publication/292398547_Effect_of_leonardite_application_on_soil_organic_matter_and_micronutrient_levels_in_an_inceptisol_soil_cultivated_with_vine_Vitis_vinifera_L)

Olivella, M. A., Del Río, J. C., Palacios, J., Vairavamurthy, M. A., y De las Heras, F. X. C. 2002. Characterization of humic acid from leonardite coal: an integrated study of PY-GC-MS, XPS and XANES techniques. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 63 (2002) 59–68. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(01\)00141-3](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00141-3)

Ortíz, M. E., Zapata, R. D., y Sadeghian, S. 2006. Propiedades de la materia orgánica y capacidad complejante sobre el Aluminio en algunos suelos ándicos en Colombia. *Cenicafé* 57(1):51-57. Consultado: 08/08/2020. En: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/160/1/arc057%2801%29051-057.pdf>

Ospina, O. 1974. El fósforo en los Andisoles. *Suelos Ecuatoriales*, 6(1), 97-136.

Parfitt, R.L., Theng, B.K.G., Whitton, J.S. and Shepherd, T.G., 1997. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. *Geoderma*, 75, 1-12. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00079-1)

Paul, E. A. 2016. The Nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biology & Biochemistry* 98 (2016) 109-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.001>

Reich, T., y Bernhard, G. 2010. Study of the role of sulfur functionalities in humic acids for uranium(VI) complexation. *Radiochim Acta* 98, 467–477 (2010). DOI: <https://doi.org/10.1524/ract.2010.1746>

Rodríguez, A., Arbelo, C. D., Notario J. S., Mora, J. L., Guerra, J. A., y Armas, C. M. 2004. Contenido y formas de Carbono Orgánico en Andosoles forestales: Aproximación a su dinámica. *Edafología*, Vol. 11 (1), pp. 67-102, 2004.

Saito B. y Seckler M.M. 2014, Alkaline extraction of humic substances from peat applied to organic-mineral fertilizer production. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 31, No. 3, pp. 675 – 682. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20140313s00002512>

Sánchez, J. A., y Rubiano, Y. 2015. Procesos específicos de formación en Andisoles, Alfisoles y Ultisoles en Colombia. *Revista EIA*, vol. 12, núm. 2, junio, 2015, pp. 85-97. ISSN: 1794-1237. Consultado: 14/11/2020. En: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1492/149240052008>

Schnitzer, M. 2000. A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter. *Advances in Agronomy* 68: 1-58, 2000.

Schwarzenbach, R.P., Gschwend, P.M. e Imboden, D.M., 1993. *Environmental Organic Chemistry*. John Wiley & Sons Inc.

Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.

Stevenson FJ. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. 2nd ed. New York: Wiley; 1994.

Sugier, D., Kolodziej, B. y Bielinska, E. 2013. The effect of leonardite application on *Arnica montana* L. yielding and chosen chemical properties and enzymatic activity of the soil. *Journal of Geochemical Exploration* 129 (2013): 76-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.013>.

Sumitra, P., Sharma, T., Saikia, D., Saikia, P. P., Borah, D., y Baruah, M. 2015. Evaluation of pKa Values of Soil Humic Acids and their Complexation Properties. *International Journal of Plant & Soil Science* 6(4): 218-228, 2015; Article no. IJPSS.2015.112 ISSN: 2320-7035. DOI: <http://dx.doi.org/10.9734/IJPSS/2015/16033>

Tan, K.H., 2014. *Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies*, second ed. CRC Press, Boca Raton, FL. Tandy, S., Bossart, K., Mueller, R., Ritschel, J., Hauser, L.

Wang, J., Wu, J., Lu, J., y Yuan, G. 2020: Effects of leonardite on the coastal saline soil improvement. *Chemistry and Ecology*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02757540.2020.1787997>

Xia, K., Weesner, F., Bleam, W. F., Bloom, P. R., Skyllberg, U. L., Helmke, P. A. 1999. XANES studies of oxidation states of sulfur in aquatic and soil humic substances. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 1240. DOI: 10.2136/sssaj1998.03615995006200050014x

## **2. Capítulo 2: Respuesta de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) a la aplicación de ácidos húmicos extraídos de Leonardita**

### **2.1 Resumen**

Esta investigación evaluó el efecto de la aplicación de ácidos húmicos (AH) extraídos de Leonardita a un suelo Andisol, sobre los contenidos nutricionales en hoja y el rendimiento de un cultivo de lechuga Batavia, en dos ciclos de producción. Las variables evaluadas fueron nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), boro (B), hierro (Fe) y zinc (Zn). Se empleó un diseño de medidas repetidas asociado a un diseño completamente al azar, con cuatro tratamientos, como factor entre-sujetos: testigo 0 l ha<sup>-1</sup> (T0); 20 l ha<sup>-1</sup> (T20); 40 l ha<sup>-1</sup> (T40) y 60 l ha<sup>-1</sup> (T60), cuatro repeticiones y como componente intra-sujetos dos ciclos de producción. Los resultados mostraron que los AH incrementaron para ambos ciclos, el contenido de Fe, Zn y Cu a nivel foliar, siendo el T60 el que logró los mejores resultados. Adicionalmente, el T60 logró las mayores producciones por ha (16.72 t para el primer ciclo y 13.29 t para el segundo), con incrementos de 17.52 y 21.29% en comparación a T0, para los ciclos 1 y 2 respectivamente. Se concluye que la aplicación de los AH extraídos de Leonardita en un cultivo de lechuga Batavia, mostró efectos positivos en la acumulación de tres micronutrientes (Fe, Zn y Cu) y aumento en la producción para las dosis más altas.

**Palabras clave:** hortalizas, abonos orgánicos, rendimiento

### **2.2 Abstract**

This research evaluated the effect of the application of humic acids (HA) extracted from Leonardite to an Andisol soil, on the nutritional contents in leaves and the yield of a Batavia

lettuce crop, in two production cycles. The variables evaluated were nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sulfur (S), boron (B), iron (Fe) and zinc (Zn). A repeated measures design associated with a completely randomized design, with four treatments, was used as a between-subject factor: control 0 l ha<sup>-1</sup> (T0); 20 l ha<sup>-1</sup> (T20); 40 l ha<sup>-1</sup> (T40) and 60 l ha<sup>-1</sup> (T60), four repetitions and as an intra-subject component two production cycles. The results showed that the HA increased for both cycles, the content of Fe, Zn and Cu at the foliar level, being the T60 the one that achieved the best results. Additionally, the T60 achieved the highest productions per ha (16.72 t for the first cycle and 13.29 t for the second), with increases of 17.52 and 21.29% compared to T0, for cycles 1 and 2 respectively. It is concluded that the application of HA extracted from Leonardite in a Batavia lettuce crop, showed positive effects on the accumulation of three micronutrients (Fe, Zn and Cu) and increased production for the highest doses.

**Keywords:** vegetables, organic fertilizers, yield

## 2.3 Introducción

La producción de hortalizas es importante en la alimentación y nutrición de la población mundial; de estas, la lechuga ha sido pieza fundamental del arte culinario. En Colombia es una de las principales hortalizas por el volumen de consumo, con una estimación de 7 a 24,8 g día<sup>-1</sup>, aumentando de forma progresiva, por tratarse de un producto de sabor agradable, con buenas características nutricionales, con propiedades medicinales y de bajo contenido calórico (Noreña *et al.*, 2014). El área de siembra de lechuga a nivel mundial ha tenido un crecimiento del 11.23% y la producción del 13.08% entre 2007-2017 (FAOSTAT, 2020). A nivel mundial, para el año 2017, el área cosechada fue de 1.227.358 ha y la producción de 26.866.557 t, con mayor porcentaje de participación de Asia (60.2%) y principalmente de China, donde la producción fue cercana a las 15.156.509 t en 632.749 ha (FAOSTAT, 2020). En Colombia la lechuga es una hortaliza importante por el área sembrada y su producción, según Agronet (2020), en el año 2018 se sembraron 2543 ha en los departamentos de Cundinamarca, Nariño, Boyacá y Antioquia, con una producción cercana a 49.892 t. El departamento de Cundinamarca es el principal productor de lechuga con el 48.04% de la producción nacional y el 47.07% del área total de siembra para el año 2018 (Agronet, 2020).

La lechuga pertenece a la familia Asteraceae, conocida anteriormente como Compositae, su nombre botánico es *Lactuca sativa* L. (Vallejo, 2004; Saavedra del R. *et al.*, 2017). En cuanto a su morfología, las hojas son basales numerosas y grandes, se desarrollan en rosetas, sus formas pueden ser ovals, oblongas, ramificadas, crespas o lisas, y pueden ser brillantes u opacas según la variedad (Sánchez, 2009; Cámara de comercio de Bogotá, 2015).

En Colombia se siembran diversos tipos varietales, entre los que se incluyen las lechugas tipo Batavia, lisa o mantequilla, tipo cos o romana, las minihortalizas tipo Baby Leaf, y las lechugas foliares lisas y crespas de diferentes tonalidades, verdes, rojas y moradas (Noreña *et al.*, 2014). En esta investigación se evaluó lechuga tipo Batavia, que se caracteriza por tener cabeza cerrada, las hojas internas forman un cogollo o cabeza firme, mientras las hojas exteriores son abiertas, gruesas, con bordes rizados y sirven de protección del cogollo (Flores *et al.*, 2012). La lechuga tiene una etapa de plantulación, estimada entre 4 y 5 semanas, previo al trasplante; y un período en campo que oscila entre 8 a 12 semanas dependiendo de la variedad (Montesdeoca, 2008).

Desde el punto de vista nutricional, la lechuga es una planta exigente en K y la extracción promedio de nutrientes por ha para el cultivo son, 100 kg de N, 50 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 250 kg de K<sub>2</sub>O, 51 kg de CaO y 22 kg MgO (Noreña *et al.*, 2014). El efecto de la aplicación de abonos orgánicos en la lechuga es alto, favorece la formación de cabeza más rápido y de mejor calidad; la forma más común de adicionar materia orgánica es a través de estiércol de corral y gallinaza (Whitaker & Ryder, 1964).

Dentro de las sustancias orgánicas empleadas en los últimos años en Colombia, se ha incrementado el uso de los AH, que son reconocidos como componentes clave de la fertilidad del suelo, porque influyen sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas, además de ayudar a regular el crecimiento de las plantas. Sus efectos benéficos son principalmente a través de la mejora de propiedades, como la agregación, la aireación y la capacidad de retención de agua (Ameri y Ali Tehranifar, 2012; Ciarkowska, 2010), adicionalmente, los ácidos húmicos ajustan el pH del suelo, favorecen el incremento de microorganismos en este, y aumentan la absorción de nutrientes por parte de las plantas (Cangi *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2010).

El efecto de las sustancias húmicas en la absorción de iones parece ser selectivo y variable, con relación a su concentración y al pH del suelo (Nardi *et al.*, 2009). Vaughan y MacDonald (1976) determinaron que el uso de sustancias húmicas aumentó la capacidad de absorción de Na y Ba, mientras que no tuvieron efecto en la absorción de Ca y Zn en remolacha.

Khaled y Fawy (2011) evaluaron el efecto de diferentes niveles de AH extraídos de Leonardita al 70% sobre el contenido de nutrientes en maíz en Egipto, evidenciando un aumento de la absorción de N, P, K, Ca, Fe, Cu, Mn y Zn con relación al control, siendo la dosis de 2 g kg<sup>-1</sup> la de mejores resultados.

En el cultivo de lechuga a nivel internacional se han realizado algunas investigaciones con el empleo de AH extraídos de Leonardita, como las que se mencionaran a continuación:

Taha *et al.* (2016), evaluaron el efecto de la aplicación de ácidos húmicos (0, 7, 10 y 13 kg fed<sup>-1</sup>) en la absorción de N, P y K en plantas de lechuga. Los resultados mostraron que, para los 50 días después de siembra (dds), la dosis de 13 kg fed<sup>-1</sup> aumento 0.5% N, 0.1% P y 0.4% K en comparación al tratamiento control; mientras que, para los 100 dds con la misma dosis, este aumento fue de 0.7% N, 0.1% P y 0.8% K.

Las investigaciones con otras enmiendas orgánicas incluyen la de Aruani *et al.*, (2008), quienes evaluaron la aplicación de estiércol de pollo en lechuga en un suelo Aridisol de Argentina, los resultados mostraron aumento en 0.4% del contenido en tejido vegetal de N, 0.46% de K y 0.17% de Ca, mientras que, el P disminuyó 0.03% comparado con un tratamiento testigo.

Masarirambi *et al.* (2010), determinaron que la aplicación de compost, obtenido de estiércol de pollo, a una dosis de 1 t ha<sup>-1</sup>, en un cultivo de lechuga, aumento la concentración en tejido vegetal en mg 100 g<sup>-1</sup> de Zn en 2.27, de Ca en 4.88 y de Fe en 4.91, en comparación a la fertilización inorgánica tradicional del cultivo.

Brito *et al.* (2014), determinaron que la aplicación de compost (fabricado a partir de residuos forestales, materiales leñosos y desechos de alimento) al suelo en plantas de lechuga cultivadas bajo invernadero en Portugal, aumento la concentración de N en 48 mg para las dosis de 15 t ha<sup>-1</sup> y 99 mg para las dosis de 30 t ha<sup>-1</sup>, en comparación al testigo

absoluto; por otra parte, la aplicación de compost aumentó la absorción de P, K y Ca, mientras que, redujo la de Fe y Mg.

En Colombia, aunque los AH y el compost son utilizados con frecuencia en el cultivo de la lechuga, la investigación sobre su efecto ha sido escasa y se ha centrado en la evaluación de rendimiento, pero no, en la absorción de nutrientes. Por ejemplo, Muñoz *et al.* (2013) obtuvieron aumentos del 420% en peso promedio de lechugas con la aplicación de compost obtenido de desechos orgánicos de fincas cafeteras (239.2 g planta<sup>-1</sup>) y del 379.5% con compost obtenido de residuos alimenticios de plazas de mercado (215.87 g planta<sup>-1</sup>) en comparación al testigo con peso promedio de 56.87 g planta<sup>-1</sup>.

Por lo mencionado anteriormente, se justifica el presente trabajo de investigación cuyo objetivo fue, evaluar el efecto de la aplicación de AH extraídos de Leonardita, sobre la absorción de nutrientes y el rendimiento de un cultivo de Lechuga Batavia, en un Andisol de la Sabana de Bogotá.

## **2.4 Materiales y métodos**

### **2.4.1 Descripción del sitio**

La investigación se llevó a cabo en un área de un cultivo comercial de lechuga ubicada en el municipio de Mosquera, Cundinamarca en las coordenadas 4°41'26.6"N 74°12'31.6"W con una temperatura entre los 13.3 ° C y los 14° C, y una precipitación promedio mensual entre los 16 mm y los 104 mm (IDEAM, 2019).

### **2.4.2 Descripción del suelo**

El suelo está clasificado como Humic Haplustands, derivado de mantos de ceniza volcánica sobre depósitos clásticos hidrogénicos, tiene un grado evolutivo moderado (IGAC, 2000; IGAC, 2017), y morfológicamente presenta una distribución de horizontes Ap (0-25 cm), A2 (25-48 cm), Bw1 (48-75 cm), Bw2 (75-93 cm) y C (93- X cm) (Anexo A). El horizonte Ap se caracteriza por tener textura franco-arcillosa, estructura granular y densidad aparente de 0.76 g. cm<sup>3</sup>, algunas de sus características químicas iniciales para cada ciclo se muestran en la tabla 2-1.

**Tabla 2-1:** Análisis químico de suelo inicial para cada ciclo

Parámetro	pH	C.E	C.O	CICE	K Int	Ca Int	Mg Int	Na Int	Fe	Mn	Cu	Zn	B	P	S
Unidad		dS m <sup>-1</sup>	%			cmol kg <sup>-1</sup>					mg kg <sup>-1</sup>				
Ciclo 1	5.8	1.21	4.17	19.95	0.55	14	3.96	1.44	124	69	0.66	86	1.3	157	117
Ciclo 2	5.72	1.67	5.8	21.54	1.07	14.5	4.15	1.82	128	63	0.69	84	1.13	205	138

### 2.4.3 Establecimiento experimental

Se llevaron a cabo dos experimentos, cada uno correspondiente a un ciclo de cultivo de 75 días, el primero de ellos entre los meses de agosto y octubre del 2018; y el segundo entre diciembre de 2018 y febrero de 2019. Se sembró lechuga de la variedad Batavia con una densidad de siembra de 96000 plantas ha<sup>-1</sup>. La fertilización del cultivo se realizó con base a los requerimientos nutricionales (107 kg N ha<sup>-1</sup>, 48 kg P ha<sup>-1</sup>, 102 kg K ha<sup>-1</sup>, 26 kg Ca ha<sup>-1</sup>, 7.5 kg Mg ha<sup>-1</sup>, 3.8 kg S ha<sup>-1</sup> y 0.3 kg B ha<sup>-1</sup>) (Noreña *et al.*, 2014), ajustada con el análisis inicial de suelos (Tabla 2-1) y distribuida en dos aplicaciones, la primera a los 5 ddt y la segunda a los 30 ddt, usando como fertilizante una fuente comercial de mezcla física, de fórmula 12-27-13-2(MgO)-1(S), más urea, sulfato de potasio y nitrato de calcio con boro (15-0-0-26CaO-0.3B). Se realizó aplicación de riego teniendo en cuenta capacidad de campo del suelo. Las demás labores agronómicas (control de malezas, control de plagas y enfermedades) se realizaron de manera similar al cultivo comercial dentro del cual se encontraba el ensayo.

### 2.4.4 Diseño experimental y tratamientos

Se empleó un diseño de medidas repetidas con el componente de factores entre-sujetos asociado a un diseño completamente al azar, con cuatro tratamientos: testigo con 0 l ha<sup>-1</sup> (T0), 20 l ha<sup>-1</sup> (T20), 40 l ha<sup>-1</sup> (T40) y 60 l ha<sup>-1</sup> (T60) y cuatro repeticiones, el ciclo como componente intra-sujetos. Cada repetición correspondió a 625 m<sup>2</sup> (Anexo B). El producto utilizado en el experimento fue un concentrado soluble que aporta 0.696 kg m<sup>-3</sup> de AH extraídos de Leonardita de origen español. Según análisis de composición reportado en etiqueta el producto aporta adicionalmente 0.172 kg m<sup>-3</sup> de K<sub>2</sub>O, 0.9 kg m<sup>-3</sup> de carbono orgánico, 0.07 kg m<sup>-3</sup> de Cu, 0.2 kg m<sup>-3</sup> de Zn, 0.0070 kg m<sup>-3</sup> de Cd, 0.025 kg m<sup>-3</sup> de Ni, 0.045 kg m<sup>-3</sup> de Pb, 0.07 kg m<sup>-3</sup> de Cr y 0.0004 kg m<sup>-3</sup> de Hg. Se realizó una aplicación en drench del producto a los 15 ddt con un volumen de agua de 320 l ha<sup>-1</sup>.

### 2.4.5 Muestreo y análisis de tejido foliar

Para la evaluación de la concentración de metales pesados en hoja de lechuga, se realizaron tres muestreos a los 30, 50 y 70 ddt, correspondientes a las etapas fenológicas de la lechuga V8, CRE1 (60% de la formación) y MC (madurez comercial) (Huerres y Caraballo, 1988). Se tomaron muestras de hojas que acababan de alcanzar la madurez en 15 plantas entre las 6:00 am y las 8:00 am por cada réplica de cada tratamiento, para un total de 16 muestras por muestreo (Hue *et al.*, 2000). Cada muestra correspondió a 300 gramos de hojas extraídos de las plantas de la zona media de cada bloque, fueron transportadas en bolsas de papel y llevadas al laboratorio para su procesamiento. Se secaron en horno a una temperatura de 50° C hasta peso constante y se molió el material. Los parámetros determinados, su método de análisis y valoración se muestran en la tabla 2-2.

**Tabla 2-2:** Método de análisis y valoración para cada parámetro del suelo determinado

Parámetro	Método de análisis
N	Micro- Kjeldahl
P	Colorimétrico
K	Emisión atómica
Ca, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn	Colorimétrico Espectrofotometría de absorción atómica
B	Colorimétrico

### 2.4.6 Determinación del peso fresco y cálculo del rendimiento del cultivo

A los 70 ddt, se seleccionaron 30 plantas al azar por repetición (120 plantas por tratamiento para cada ciclo), excluyendo las filas de lechugas ubicadas en los bordes externos, para evitar el efecto de borde. Se pesaron y se calculó el peso fresco promedio por tratamiento. El rendimiento fue calculado multiplicando el peso promedio de lechuga obtenido para cada tratamiento por 86.400 plantas ha<sup>-1</sup> y expresado en t ha<sup>-1</sup>.

### 2.4.7 Análisis estadístico y procesamiento de datos

Se obtuvieron promedios para cada una de las respuestas en cada nivel de los factores inter e intra-sujetos para los contenidos de los elementos en hojas. Los contenidos de los

elementos totales en hojas se analizaron empleando un análisis univariado y multivariado, este último, ajustado a partir de un diseño de medidas repetidas, usando el tratamiento como el factor entre-sujetos y el ciclo como factor intra-sujetos. Estos resultados se complementaron con un análisis de perfiles, una técnica de estadística multivariante que es equivalente al análisis multivariado de varianza (MANOVA) para tratamientos con medidas repetidas (Bulut y Desjardins, 2018). Para la variable peso fresco de lechuga se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias por Tukey ( $\alpha= 0.05$ ).

Los datos fueron procesados por el programa SAS University Edition (SAS Institute, Inc.) para el análisis univariado y multivariante con diseño en medidas repetidas. El software R se utilizó para el análisis de perfiles.

## 2.5 Resultados y discusión

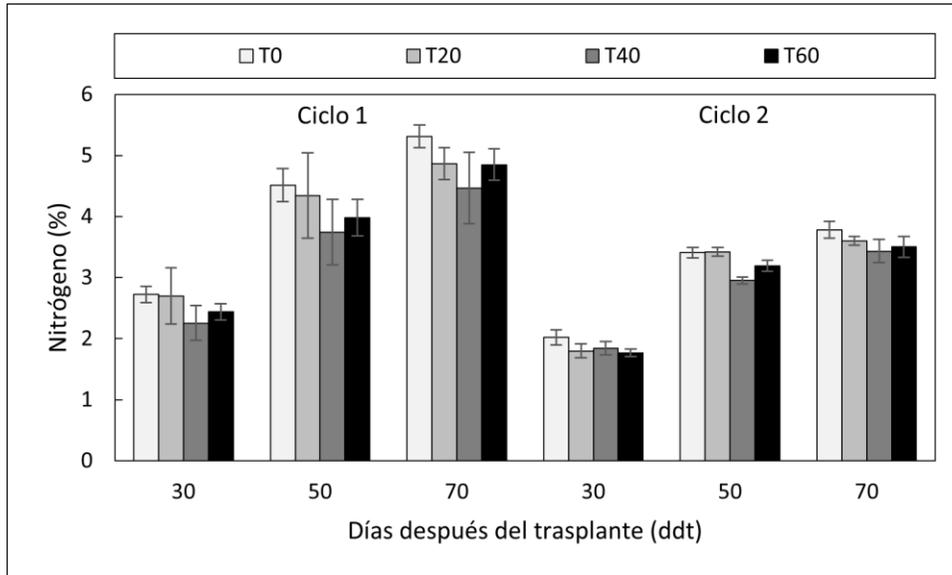
### 2.5.1 Contenido de nutrientes en tejido foliar

El efecto de la aplicación de AH sobre el contenido de algunos nutrientes en hojas de lechuga, puede deberse principalmente a su efecto en la absorción de estos elementos, a través, de la formación de complejos AH solubles (metal-húmicos) (Chen *et al.*, 2004), evitando la lixiviación del nutriente y haciendo que estos sean más biodisponibles para las plantas (Halim *et al.*, 2003; García *et al.*, 2004). Otro efecto que se ha encontrado es la inducción de la actividad de la H<sup>+</sup>- ATPasa que, a su vez, puede energizar los transportadores de iones secundarios y promover la absorción de nutrientes (Canellas *et al.*, 2015).

#### ▪ Contenido de nitrógeno

El análisis de perfiles mostró igualdad de tratamientos para el primer ciclo e interacción tiempo- tratamiento para el segundo ciclo, por lo cual, se realizó un análisis de tipo multivariado. El análisis evidenció para el muestreo a los 30 ddt del segundo ciclo, diferencias significativas de T0 (2.02%) con T20 (1.79%) y de T0 con T60 (1.76%); para el muestreo a los 50 ddt se dieron diferencias entre todos los tratamientos, exceptuando T0 (3.40%) con T20 (3.42%), con valores promedio de 2.95 y 3.19% N para T40 y T60 respectivamente. Para el muestreo a los 70 ddt, la diferencia se dio entre T0 (3.78%) y T40

(3.43%). En la figura 2-1 se observa mayor acumulación de N para el T0 en comparación a los tratamientos con AH.



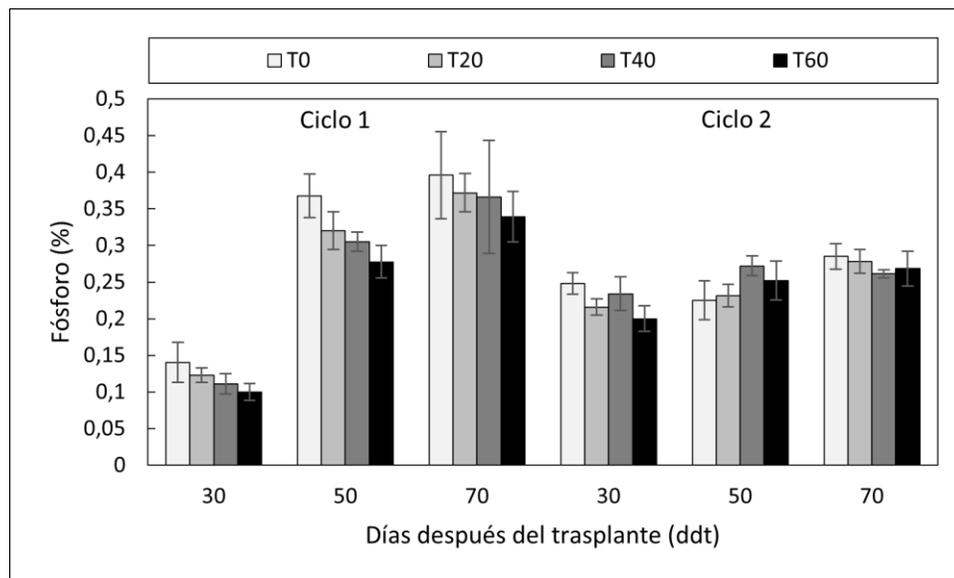
**Figura 2-1:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de N en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

Varios autores han reportado diferentes efectos de la aplicación de AH en la absorción de N como la inhibición de la actividad de la ureasa por HA (Vaughan y Ord, 1991), aumento del 89% del transporte de nitratos en comparación al tratamiento control (Nardi *et al.*, 2000) y la inducción de los genes BnNRT1.1 y BnNRT2.1 que codifican los transportadores de nitrato (Jannin *et al.*, 2012); sin embargo, en esta investigación no parece haber un efecto en la acumulación de N con la aplicación de AH. Lo anterior, puede deberse a la dinámica del N en el suelo Andisol empleado, donde la mayor parte de este elemento disponible para la planta, depende de procesos de mineralización y debido a sus propiedades edafogénicas se favorece la formación de complejos órgano-minerales, que junto a las condiciones climáticas frías conlleva a que sus tasas de mineralización, el reciclaje de nutrientes y la descomposición de la materia orgánica (MO), sea lenta con respecto a otros suelos (Ortiz *et al.*, 2006; Africando *et al.* 2016).

- **Contenido de fósforo**

Al igual que el N, esta variable mostró igualdad de tratamientos para el primer ciclo e interacción tiempo-tratamiento para el segundo ciclo, según análisis de perfiles. El análisis multivariado evidenció diferencias para el muestreo a los 30 ddt del segundo ciclo de T0 (0.24%) con T60 (0.2%) y a los 50 ddt entre T0 (0.22%) y T40 (0.27%).

Aunque se ha demostrado que la aplicación de AH reduce la fijación de P en el suelo (Heng, 1989; Hua *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2020) y, forma complejos AH-P que son fácilmente asimilables por las plantas (Raina y Goswami, 1988), en esta investigación los contenidos de P en las hojas de lechuga, para los tratamientos con AH de Leonardita, fueron inferiores en el primer ciclo a los encontrados para T0, mientras que, para el segundo ciclo el comportamiento de los tratamientos con AH fue similar exceptuando el muestreo a los 50 ddt (Figura 2-2).

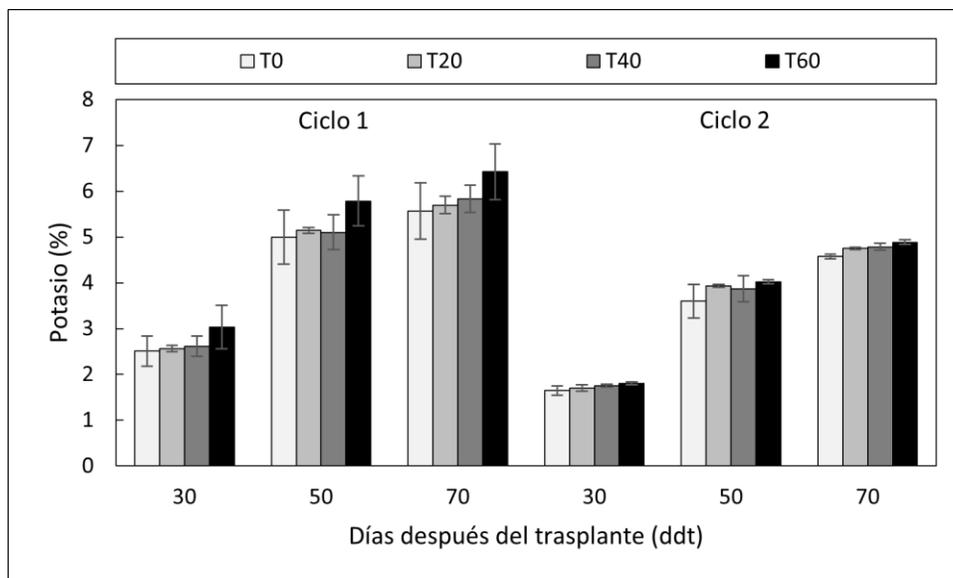


**Figura 2-2:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de P en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia

La diferencia entre ciclos se puede atribuir a los cambios en las condiciones climáticas (segundo ciclo menos húmedo que el primero). La respuesta del P para el primer ciclo pudo deberse principalmente a la dinámica de este nutriente en el suelo Andisol seleccionado, ya que, son altamente fijadores de fósforo debido a la presencia de la alófana en la fracción coloidal (Ospina, 1974; Espinosa, 1996).

- **Contenido de potasio**

El análisis de perfiles mostró diferencia de tratamientos sin efecto tiempo-tratamiento para el contenido de K en ambos ciclos, por lo que, fue necesario un análisis de tipo univariante. Aunque las diferencias no fueron significativas, este nutriente si muestra una tendencia a aumentar con las dosis de los AH en los dos ciclos (Figura 2-3), aunque su respuesta para los segundos muestreos evidencia un leve incremento del T20 sobre el T40.



**Figura 2-3:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de K en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia

Los resultados encontrados en el contenido de K en hojas de lechuga con la aplicación de AH de Leonardita (Figura 2-3) concuerdan con los aumentos reportados en contenidos de K en plantas de tomate (Tenshia y Singaram, 1992), maíz (Khaled y Fawy, 2011; Taha *et al.* 2016), melón (Kazemi, 2013) y ajo (Denre, *et al.*, 2014).

El aumento en la concentración de K en hojas de lechuga, por la aplicación de AH está relacionado directamente con el incremento del K intercambiable encontrado en el análisis del suelo. Según Samson y Visser (1989) los AH inducen un incremento en la permeabilidad de las bio-membranas por electrolitos que representan un aumento de la absorción de K.

- **Contenido de calcio, magnesio y azufre**

Para estas variables, no se evidenció efecto de la interacción tiempo-tratamiento ni de tratamientos, según el análisis de perfiles.

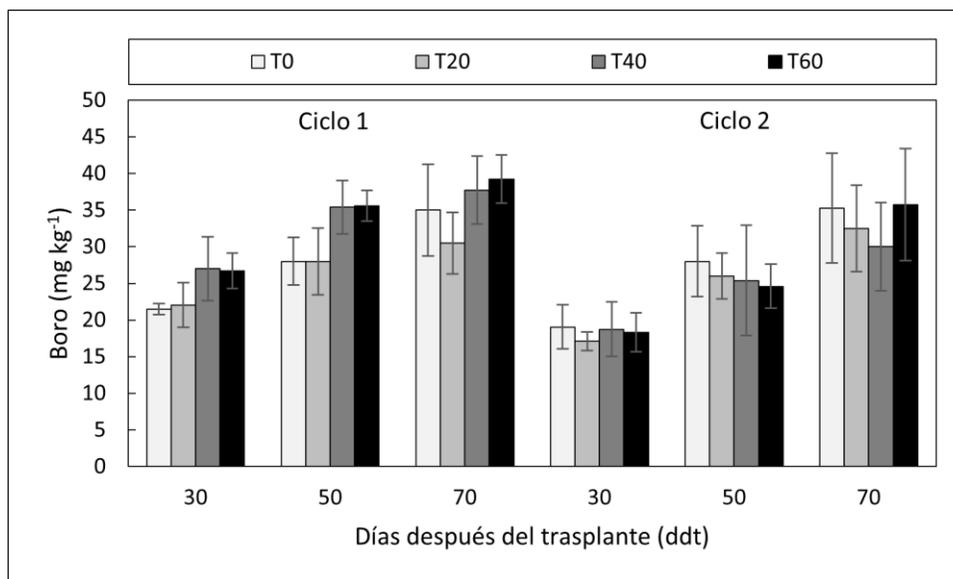
La aplicación de AH no presentó una tendencia clara en el contenido de Ca y Mg en hojas, resultados similares a los encontrados en plantas de maíz por Karaman *et al.* (2017) que determinaron que la aplicación de AH a dosis de 60 mg kg<sup>-1</sup>, respecto al testigo, disminuyó el contenido de Ca y Mg, mientras que, con la dosis de 120 mg kg<sup>-1</sup> el contenido de Ca fue similar al de testigo y el de Mg aumentó con relación a dicho testigo. El contenido promedio del primer ciclo varió de 0.28 a 0.74% para Ca y de 0.07 a 0.20% para Mg, mientras que, para el segundo ciclo el rango fue de 0.40 a 0.59% para Ca y de 0.09 a 0.21 para Mg.

En lo que respecta al S, Jannin *et al.* (2012) encontraron que el 80% de los genes involucrados en el metabolismo de los sulfatos, fueron regulados positivamente por AH a través de los genes implicados en la captación y asimilación de sulfatos (transportador de sulfato, ATP sulfurilasa y serina acetiltransferasa), sin embargo, en esta investigación el efecto de la aplicación de AH no fue significativo, ni presentó una tendencia clara. El rango de variación para el contenido de S fue de 0.07 a 0.21% para el primer ciclo y de 0.09 a 0.20% para el segundo ciclo.

#### ▪ **Contenido de boro**

El análisis de perfiles mostró diferencia de tratamientos para el contenido de B en el primer ciclo, para el segundo ciclo se dio igualdad de tratamientos. El análisis univariado mostró diferencias significativas de T20 (26.85 mg kg<sup>-1</sup>) con T40 (33.38 mg kg<sup>-1</sup>) y con T60 (33.85 mg kg<sup>-1</sup>). En la figura 2-4 se observa que, para el primer ciclo los tratamientos T40 y T60 obtuvieron valores mayores en comparación a los demás tratamientos, pero en el segundo ciclo no se presentó una tendencia clara.

Los resultados encontrados para T40 y T60 en el primer ciclo, concuerdan con lo reportado por Karaman *et al.* (2017) quienes con la aplicación de AH a dosis de 60 y 120 mg kg<sup>-1</sup>, aumentaron los contenidos de B en plantas de maíz en un 4.28 y 8.10%, respectivamente, en comparación al testigo.



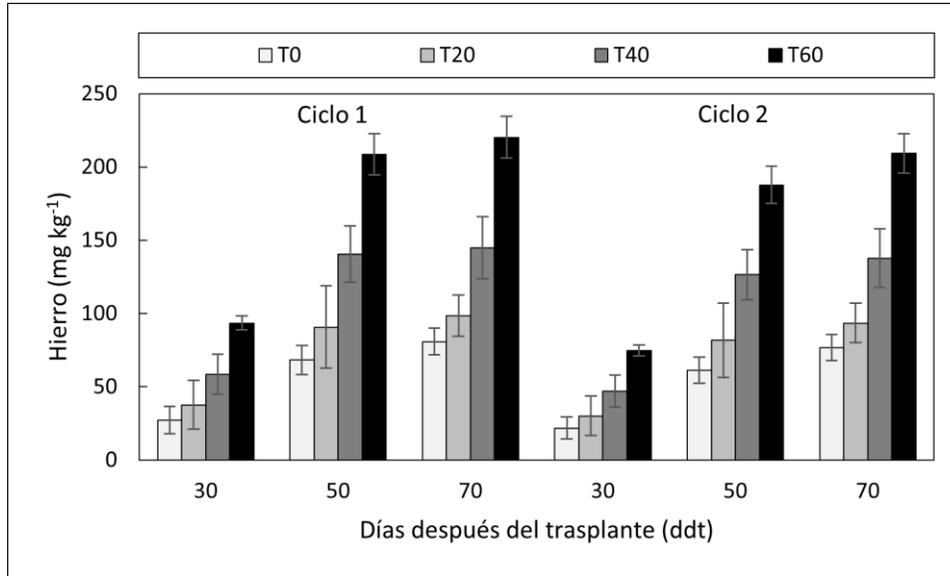
**Figura 2-4:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de B en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia

#### ▪ Contenido de hierro

El análisis de perfiles mostró interacción tiempo tratamiento para el contenido de Fe en ambos ciclos de producción, razón por la cual esta variable se analizó con estadística multivariable. Para los dos ciclos, este análisis no mostró diferencias entre T0 y T20 para ninguno de los muestreos, pero sí entre los demás tratamientos, exceptuando T20 con T40 a los 30 ddt.

Los aumentos del contenido de Fe con la aplicación de AH (Figura 2-5), concuerdan con lo encontrado por Khaled y Fawy (2011) quienes con 2 g kg<sup>-1</sup> de AH de Leonardita al 70%, aumentaron el contenido de Fe en plantas de maíz, Karaman *et al.* (2017) para el mismo cultivo, con la aplicación de AH a dosis de 60 y 120 mg kg<sup>-1</sup>, encontraron aumentos en los contenidos de Fe en un 17.6 y 20.6% respectivamente, en comparación al testigo.

Aguirre *et al.* (2009) demostraron que la aplicación de AH de Leonardita, pueden incidir en la absorción de Fe en raíces, debido a mecanismos moleculares (Fe<sup>+3</sup> quelato reductasa/ transportador de Fe<sup>+2</sup>).



**Figura 2-5:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Fe en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

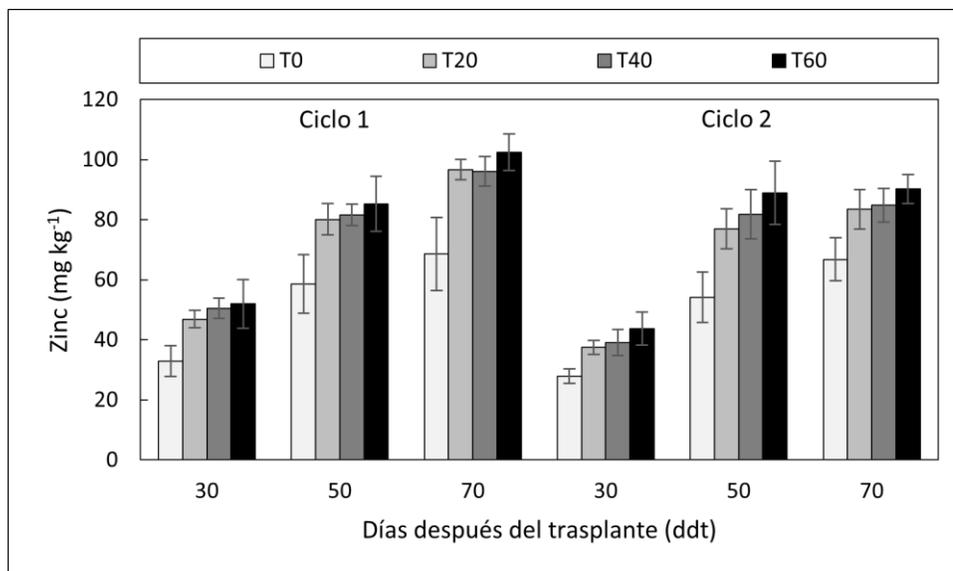
#### ▪ Contenido de zinc

Para esta variable, al igual que el contenido de Cu, el análisis de perfiles mostró diferencia de tratamientos para ambos ciclos, por lo cual, se realizó un análisis de tipo univariante. El análisis mostró diferencias significativas entre los tratamientos para ambos ciclos. Para el primer ciclo se dieron diferencias de T0 (53.41 mg kg<sup>-1</sup>) con los demás tratamientos, con valores promedios de 74.54, 76.07 y 79.9 mg kg<sup>-1</sup> para T20, T40 y T60 respectivamente. Para el segundo ciclo, las diferencias solo fueron significativas entre T0 (49.64 mg kg<sup>-1</sup>) y T60 (74.34 mg kg<sup>-1</sup>). Para ambos ciclos y para todos los muestreos, el T60 obtuvo los mayores contenidos de Zn a nivel foliar.

Los aumentos encontrados en el contenido de Zn en hojas de lechuga con la aplicación de AH de Leonardita (Figura 2-6) concuerdan con los aumentos reportados en contenidos de Zn en plantas de tomate (Tenshia y Singaram, 1992), maíz (Khaled y Fawy, 2011; Taha *et al.* 2016) y ajo (Denre, *et al.*, 2014).

El aumento en los contenidos de Zn en hojas de lechuga por la aplicación de AH podría deberse, según Tenshia y Singaram (1992) a que estos evitan la formación de complejos insolubles de Zn en el suelo y facilitan su absorción por la planta. Adicionalmente, la aplicación de AH al suelo, aumentó el contenido de Zn en ambos ciclos y en todos los

muestreos, a través de la formación de complejos Zn-AH, favoreciendo la mayor absorción del nutriente en comparación al tratamiento testigo.

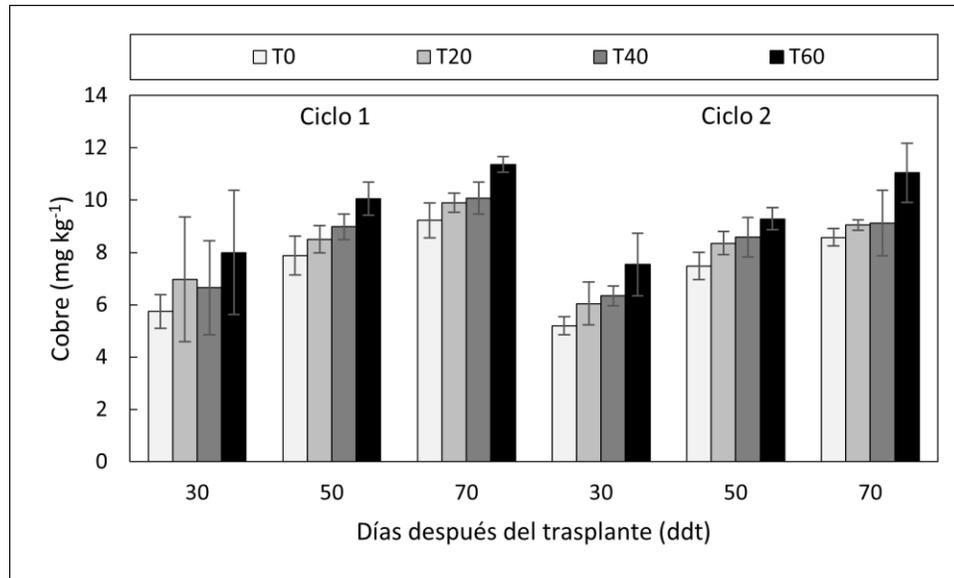


**Figura 2-6:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Zn en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

#### ▪ Contenido de cobre

El análisis de perfiles evidenció la diferencia de tratamientos en el contenido de Cu en hojas para ambos ciclos, exigiendo realizar un análisis de tipo univariante. El análisis mostró, para ambos ciclos, diferencias significativas entre T0 y T60, con un incremento a favor de T60 de 22.34 y 23.73%, para el ciclo 1 y ciclo 2, respectivamente. En la figura 2-7, se observa una tendencia clara con el aumento en el contenido de Cu en hojas con la aplicación de los AH, en comparación con el T0 para ambos ciclos y en todos los muestreos.

En el caso del Cu, la aplicación de AH tiene un efecto similar al que se da con otros micronutrientes, a través de la formación de complejos AH solubles (metal-húmicos) que mejoran la nutrición vegetal (Chen *et al.*, 2004).

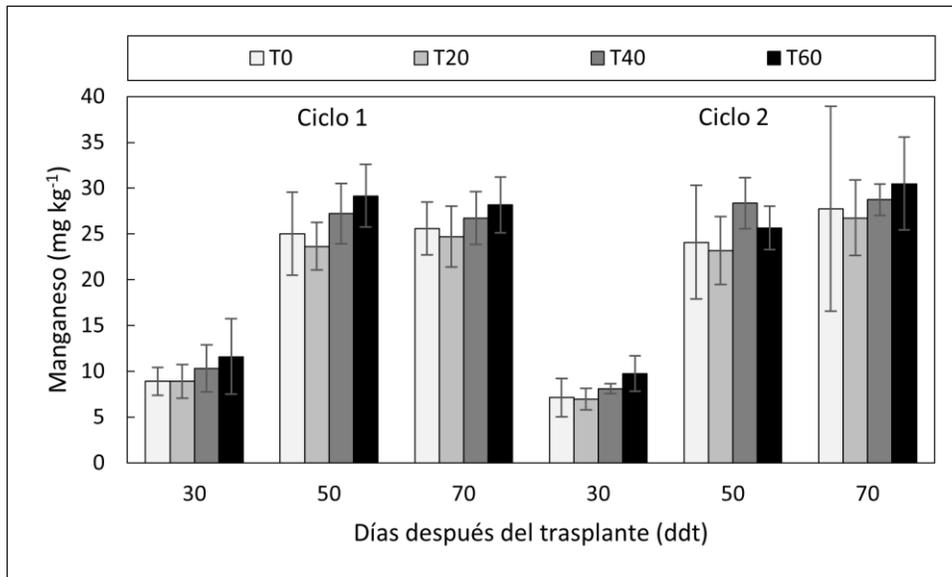


**Figura 2-7:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Cu en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

- **Contenido de manganeso**

Este nutriente mostró a través del análisis de perfiles, diferencia de tratamientos para el primer ciclo y para el segundo presentó igualdad de tratamientos. Aunque el análisis univariado no mostró diferencias significativas entre tratamientos para el primer ciclo, si se observan en la figura 2-8, mayores valores de contenido de Mn para T40 y T60 en comparación al T0.

Los resultados concuerdan con lo encontrado por Khaled y Fawy (2011) quienes con 2 g kg<sup>-1</sup> de AH de Leonardita al 70%, aumentaron el contenido de Mn en plantas de maíz.



**Figura 2-8:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Mn en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia

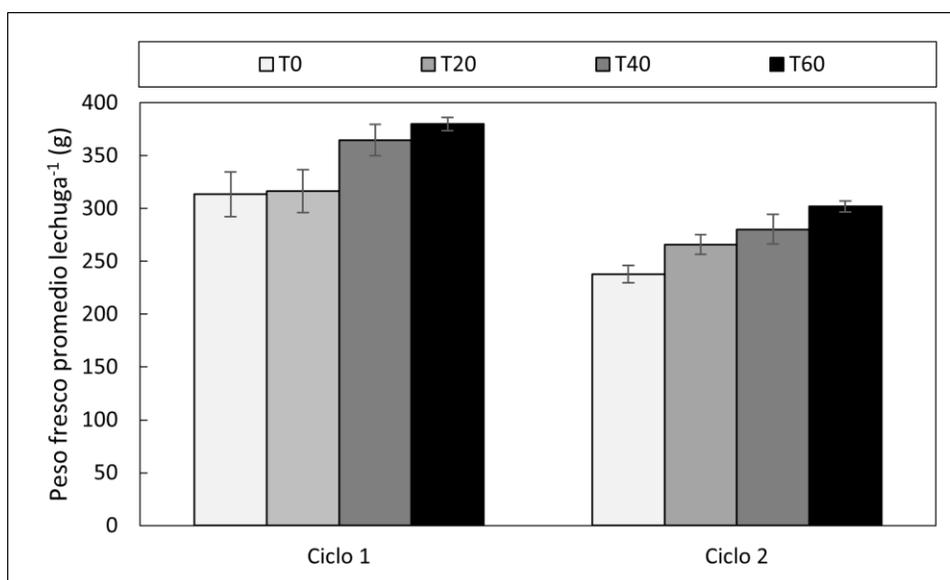
### 2.5.2 Peso fresco y rendimiento del cultivo

Para ambos ciclos de cultivo, el análisis univariado no mostró diferencias significativas entre T0 y T20, pero sí entre los demás tratamientos. El T60 obtuvo los mayores pesos promedio de lechuga (379.9 g para el ciclo 1 y 301.9 g para el ciclo 2) en comparación a los demás tratamientos (Figura 2-9).

Empleando los datos obtenidos en la figura 2-9 y con base en el procedimiento descrito en la metodología para esta variable, se generó la tabla 2-3, donde se observa el rendimiento de lechuga Batavia, calculado por tratamiento para cada ciclo y entre ciclos, evidenciándose una reducción del 21.01% en los rendimientos en el segundo ciclo (23.65 t ha<sup>-1</sup>) en comparación al primero (29.69 t ha<sup>-1</sup>).

Al comparar el efecto por tratamiento, se observa en la Tabla 2-3 que la producción por ha aumentó con el incremento de la dosis de AH para los dos ciclos, siendo el T60 el que logró los mayores valores y las mayores diferencias con respecto a T0 (17.48 y 21.31% más producción para los ciclos 1 y 2 respectivamente). Los rendimientos encontrados en esta investigación son superiores a los reportados para lechuga variedad lisa el año 2018 por Agronet (2020), para el departamento de Cundinamarca (19.25 t ha<sup>-1</sup>) y para el

municipio de Mosquera (20 t ha<sup>-1</sup>). Es importante tener en cuenta, que en Colombia no se reportan datos oficiales para la variedad de lechuga Batavia.



**Figura 2-9:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el peso fresco promedio para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

**Tabla 2-3:** Rendimiento (t ha<sup>-1</sup>) de lechuga Batavia por ciclo y por tratamiento

Ciclo de producción	Rendimiento por tratamiento (t ha <sup>-1</sup> )			
	T0	T20	T40	T60
Ciclo 1	27.08	27.35	31.52	32.82
Ciclo 2	20.53	22.97	24.21	26.09

Los resultados concuerdan con el aumento en el rendimiento, con la aplicación de AH, reportada para otros cultivos como tomate (Atiyeh *et al.*, 2002; Olivares *et al.*, 2015), haba (Akinci *et al.*, 2009), frijol (Rosa *et al.*, 2009; Ibrahim y Ramadan, 2015), uva (Ferrara y Brunetti, 2010), brócoli (Selim y Mosa, 2012), ajo (Abdel-Razzak y El-Sharkawy, 2013), cebolla (Kandil *et al.*, 2013, Bettonia *et al.*, 2014), crisantemo (Fan *et al.*, 2014) y papa (Suh *et al.*, 2014).

Con base en lo mencionado, el aumento en los rendimientos de los cultivos se ha asociado principalmente al incremento en la absorción y eficiencia del uso de los nutrientes, estimulada por la aplicación de AH (Selim y Mosa, 2012; Denre *et al.*, 2014). Otros efectos de los AH extraídos de Leonardita que pueden favorecer los aumentos en los rendimientos,

incluyen modificación de la arquitectura de la raíz, a través de la proliferación y alargamiento de raíces secundarias, mejoramiento del metabolismo de N (aumento de la actividad de la glutamina sintetasa), por tanto, aumentando la producción de proteína (Conselvan *et al.*, 2017) y, promoviendo el crecimiento en el suelo de microorganismos benéficos para la planta (Piccolo, 2012).

## 2.6 Conclusión

La aplicación de los AH extraídos de Leonardita en un cultivo de lechuga Batavia, en un suelo Andisol de la Sabana de Bogotá, se manifestó en una mejor absorción de nutrientes y aumento del rendimiento, debido a que los ácidos húmicos incrementan en el suelo, la capacidad de retención, intercambio y disponibilidad de los nutrientes para la planta.

## 2.7 Bibliografía

Abdel-Razzak, H.S., El-Sharkawy, G.A. 2013. Effect of biofertilizer and humic acid applications on growth, yield, quality and storability of two garlic (*Allium sativum* L.). *Asian J. Crop Sci.* 5, 48–63. DOI: <https://doi.org/10.3923/ajcs.2013.48.64>

Africano, K., Cely, G., y Serrano, P. 2016. Potencial de Captura de CO<sub>2</sub> asociado al componente edáfico en páramos Guantiva-La Rusia, departamento de Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 21(1), 91-110. DOI: <https://doi.org/10.19053/01233769.4572>

Agronet (Red de información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano). Fecha de consulta: 3 de febrero de 2020. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>.

Aguirre, E., Leménager, D., Bacaicoa, E., Fuentes, M., Baigorri, R., Zamarrero, A.M., García-Mina, J.M. 2009. The root application of a purified leonardite humic acid modifies the transcriptional regulation of the main physiological root responses to Fe deficiency in Fe-sufficient cucumber plants. *Plant Physiol. Biochem.* 47, 215–223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.11.013>

Akinci, S., Büyükkeskin, T., Eroglu, A., Erdogan, B.E. 2009. The effect of humic acid on nutrient composition in broad bean (*Vicia faba* L.) roots. *Not. Sci. Biol.* 1, 81–87. DOI: <https://doi.org/10.15835/nsb.1.1.3489>

Ameri, A., y Ali Tehranifar, A. J. 2012. Effect of humic on nutrient uptake and physiological characteristic *Fragaria ananassa* var. Camarosa. *J. Biol. Environ. Sci.* 6 (16), 77-79. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1049.54>

Aruani, M. C., Gili, P., Fernández, L., González, R., Reeb, P., y Sánchez, E. 2008. Utilización del nitrógeno en diferentes manejos de fertilización en Lechuga (*Lactuca sativa* L.) y su efecto sobre algunas variables biológicas del suelo, Neuquen- Argentina. DOI: <https://doi.org/10.4206/agrosur.2008.v36n3-04>

Atiyeh, R.M., Lee, S., Edwards, C.A., Arancon, N.Q., Metzger, J.D. 2002. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresour. Technol.* 84, 7–14. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00017-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00017-2)

Bettonia, M.M., Mogora, A.F., Paulettia, V., Nieves Goicoecheab, N. 2014. Growth and metabolism of onion seedlings as affected by the application of humic substances, mycorrhizal inoculation and elevated CO<sub>2</sub>. *Sci. Hortic.* 180, 227–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.037>

Brito, L. M., Monteiro, J. M., Mourao, I., y Joao Coutinho. 2014. Organic lettuce growth and nutrient uptake response to lime, compost and rock phosphate. *Journal of Plant Nutrition*, 37:1002-1011. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.881858>

Bulut, O, y Desjardins, C. D. 2018. Profile R: Profile Analysis of Multivariate Data in R. R Package Versión 0.3-5. Consultado: 15/10/2020. En: <https://CRAN.R-project.org/package=profileR>

CCB (Cámara de comercio de Bogotá). 2015. Manual Lechuga. Núcleo Ambiental S.A.S. Programa de apoyo agrícola y agroindustrial- Vicepresidencia de fortalecimiento empresarial- Cámara de Comercio de Bogotá. Disponible en: <https://www.ccb.org.co/content/download/Lechuga>

Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., y Piccolo, A. 2015. Review: Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae* 196 (2015) 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>

Cangi, R., Tarakcioglu, C. y Yasar, H. 2006. Effect of humic acid applications on yield, fruit characteristics and nutrient uptake in Ercis grape (*V. vinifera* L.) cultivar. *Asian J. Chem.*, 18 (2) (2006), pp. 1493-1499.

Chen, Y., De Nobili, M., y Aviad, T. 2004. Stimulatory effects of humic substances on plant growth. In: Magdoff, F., Weil, R.R. (Eds.), *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Ciarkowska, K., 2010. Effect of fertilization on the structure of upland grassland soil. *Pol. J. Environ. Stud.* 19 (4), 693– 697.

Conselvan, G. B., Pizzeghello, D., Francioso, O., Di Foggia, M., Nardi, S., y Carletti, P. 2017. Biostimulant activity of humic substances extracted from leonardites. *Plant and Soil* 420(1-2). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3373-z>.

Denre, M., Ghanti, G., Sarkar, K., 2014. Effect of humic acids application on accumulation of mineral nutrition and pungency in garlic (*Allium sativum* L.). *Int. J. Biotech. Mol. Biol Res.* 5, 7–12. DOI: <https://doi.org/10.5897/IJBMBR2014.0186>

Espinosa, J. 1996. Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica (Informaciones Agronómicas N.º 23). Quito, Ecuador: Instituto de la potasa y el fósforo (Inpofos).

Fan, H.M., Wang, X.W., Sun, X., Li, Y.Y., Sun, X.Z., Zheng, C.S. 2014. Effects of humic acid derived from sediments on growth, photosynthesis and chloroplast ultrastructure in chrysanthemum. *Sci. Hortic.* 177, 118–123. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.05.010

FAOSTAT (División de Estadística Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2020. Estadísticas de producción de hortalizas. Fecha de consulta: 3 de febrero de 2020. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>.

Ferrara, G., Brunetti, G. 2010. Effects of the times of application of a soil humic acid on berry quality of table grape (*Vitis vinifera* L.) cv Italia. *Span. J. Agric. Res.* 8, 817–822. Ferro, N., Gallegos. DOI: <https://doi.org/10.5424/1283>.

Flores, L., Gonzales, G., Pulido, P., Salamanca, S & Zamundio, A. 2012. Manual para el cultivo de hortalizas. Bogota, Colombia: Produmedios.

García, J. M., Antolin, M.C., y Sanchez, M., 2004. Metal-humic complexes and plant micronutrient uptake: a study based on different plant species cultivated in diverse soil types. *Plant Soil* 258, 57–68. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000016509.56780.40>

Halim, M., Conte, P., y Piccolo, A. 2003. Potential availability of heavy metals to phytoextraction from contaminated soils induced by exogenous humic substances. *Chemosphere* 37, 255–259. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00185-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00185-1)

Heng, L.C. 1989. Influence of humic substances on P-sorption in Malaysian soils under rubber. *J. Natural Rubber Res.*, 4(3): 186-194.

Hua, Q. X., Li, J. Y., Zhou, J. M., Wang, H. Y., Du, C. W., y Chen, X. Q. 2008. Enhancement of Phosphorus Solubility by Humic Substances in Ferrosols. *Pedosphere* Volume 18, Issue 4, August 2008, Pages 533-538. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(08\)60044-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60044-2)

Hue, N. V., Uchida, R., Ho M. C. 2000. Sampling and analysis of soils and plant tissues: How to take representative samples, how the samples are tested. In: Silva JA, Uchida RS, editors. *Plant nutrient management in Hawaii's soils: approaches for tropical and subtropical agriculture*. Honolulu (HI): University of Hawaii. p. 23-30.

Huerres, P.C., y N.L. Caraballo. 1988. *Horticultura*. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba.

Ibrahim, E.A., Ramadan, W.A. 2015. Effect of zinc foliar spray alone and combined with humic acid or/and chitosan on growth, nutrient elements content and yield of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants sown at different dates. *Sci. Hortic.* 184, 101–105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.11.010>

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2019. Datos de temperatura y precipitación- Estación Tibaitata, Mosquera, Cundinamarca.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2000. Estudio general de suelos y zonificación de tierras de Cundinamarca.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2017. Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Cundinamarca.

Jannin, L., Arkoun, M., Ourry, A., Laîné, P., Goux, D., Garnica, M., Fuentes, M., San, Francisco, S., Baigorri, R., Cruz, F., Houdusse, F., Garcia-Mina, J.-M., Yvin, J.-C., Etienne, P. 2012. Microarray analysis of humic acid effects on *Brassica napus* growth: involvement of N, C and S metabolisms. *Plant Soil* 359, 297–319. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1191-x>

Kandil, A.A., Sharief, A.E., Fathalla, F.H. 2013. Onion yield as affected by foliar application with amino and humic acids under nitrogen fertilizer levels. *ESci J. Crop Prod.* 2, 62–72

Karaman, M. R., Turan, M., Horuz, A., Tüfenkçi, M. S., y Adiloglu, A. 2017. Interactive Effects of Boron and Humic Acid on the Growth and Nutrient Status of Maize Plant (*Zea mays* L.). *International Journal of Plant & Soil Science* 19(2): 1-9, 2017. DOI: <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2017/36430>

Kazemi, M. 2013. Effect of Foliar Application of Humic Acid and Potassium Nitrate on Cucumber Growth. *Bull. Env. Pharmacol. Life Sci.*, Vol 2 (11) October 2013: 03-06. Consultado: 16/11/2020. En: [http://www.bepils.com/oct\\_2013/2.pdf](http://www.bepils.com/oct_2013/2.pdf)

Khaled, H. y Fawy, H. 2011. Effect of different level of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity. *Soil & Water Res.*, 6, 2011 (1): 21–29. DOI: <https://doi.org/10.17221/4/2010-SWR>

Masarirambi, M. T., Hlawe, M. M., Oseni, O. T., y Sibiya, T. 2010. Effects of organic fertilizers on growth, yield, quality and sensory evaluation of red lettuce (*Lactuca sativa* L.) 'Veneza Roxa'. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 2010, 1(6):1319-1324. DOI: <https://doi.org/10.5251/abjna.2010.1.6.1319.1324>

Montesdeoca, P. N. 2008. Caracterización física, química y funcional de la Lechuga rizada, para la creación de una norma técnica ecuatoriana, por parte del instituto ecuatoriano de normalización. Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial.

Muñoz, J. M., Muñoz, J. A., y Montes, C. 2015. Evaluation of organic manures in lettuce and cabbage plants at Popayán, Cauca. *Bioteconología en el Sector Agropecuario y*

Agroindustrial. Vol 13 No. 1 (73-82) Enero - Junio 2015. Consultado: 23/11/2020. En: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v13n1/v13n1a09.pdf>

Nardi, S., Pizzeghello, D., Gessa, C., Ferrarese, L., Trainotti, L., Casadoro, G. 2000. A low molecular weight humic fraction on nitrate uptake and protein synthesis in maize seedlings. *Soil Biol. Biochem.* 32, 415–419. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00168-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00168-6)

Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., y Vianello, A., 2002. Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 1527–1536. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8)

Noreña, J. J., Aguilar, P. A., Espitia, E. M., Tamayo, P. J., Arguello, O., y Arroyave, M. 2014. Modelo tecnológico para el cultivo de lechuga en el Oriente Antioqueño. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Consultada: 07/06/2020 En: [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13758/75472\\_65800.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13758/75472_65800.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

NTC (Norma técnica colombiana) 5167. 2004. Productos para la industria agrícola. productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

Olivares, F.L., Aguiar, N.O., Rosa, R.C.C., Canellas, L.P. 2015. Substrate biofortification in combination with foliar sprays of plant growth promoting bacteria and humic substances boosts production of organic tomatoes. *Sci. Hortic.* 183, 100–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.11.012>

Ortiz, M. E., Zapata, R. D., y Sadeghian, S. 2006. Propiedades de la materia orgánica y capacidad complejante sobre el Aluminio en algunos suelos ándicos en Colombia. *Cenicafé* 57(1):51-57. Consultado: 08/08/2020. En: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/160/1/arc057%2801%29051-057.pdf>

Ospina, O. 1974. El fósforo en los Andisoles. *Suelos Ecuatoriales*, 6(1), 97-136.

Piccolo, A. 2012. The nature of soil organic matter and innovative soil management to fight global changes and maintain agricultural productivity. In: Piccolo, A. (Ed.), *Carbon Sequestration in Agricultural Soils: a Multidisciplinary Approach to Innovative Methods*. Springer, Heidelberg, pp. 1–20.

Raina, J.N. and Goswami, K.P. 1988. Effect of fulvic acid and fulvates on the growth and / nutrient uptake by maize plant. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 36: 264-268.

Rosa, C.M., Castilhos, R.M.V., Vahl, L.C., Castilhos, D.D., Pinto, L.F.S., Oliveira, S.O., Leal, O.A. 2009. Effect of humic-like substances on potassium uptake kinetics, plant growth and nutrient concentration in *Phaseolus vulgaris* L. *R. Bras. Ci. Solo* 33, 959–967. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400020>

Saavedra del R., G, Corradini S., F, Antúnez B., A., Felmer E., S., Estay P., P., y Sepúlveda R., P. 2017. Manual de producción de lechuga. Boletín INIA N° 09. Instituto de Desarrollo Agropecuario- Instituto de Investigaciones Agropecuaria. ISSN 0717 – 4829. Santiago, Chile, 2017. Disponible en: <http://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/09%20Manual%20Lechuga.pdf>

Samson, G., & Visser, S. A. 1989. Surface-active effects of humic acids on potato cell membrane properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 21(3), 343–347. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(89\)90141-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(89)90141-7)

Selim, E.-M., Mosa, A.A. 2012. Fertigation of humic substances improves yield and quality of broccoli and nutrient retention in a sandy soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 175, 273–281. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201100062>

Suh, H.Y., Yoo, K.S., Suh, S.G. 2014. Tuber growth and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) as affected by foliar or soil application of fulvic and humic acids. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 55, 183–189. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13580-014-0005-x>

Taha, A. A., Omar, M. M., y Ghazy. M. A. 2016. Effect of Humic and Fulvic Acids on Growth and Yield of Lettuce. *Plant. J. Soil Sci. and Agric. Eng., Mansoura Univ., Vol. Vol. 7(8): 517 - 522, 2016.* DOI: <https://doi.org/10.21608/jssae.2016.39782>

Tenshia, J. S. V. y Singaram, P. 1992. Influence of humic acid application on yield, nutrient availability and uptake in tomato. *Madras Agric J* 92, 10–12.

Vallejo, F. A. 2004. Hortalizas en Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Palmira.

Vaughan, D. y Ord, B.G. 1991. Influence of natural and synthetic humic substances on the activity of urease. *J. Soil Sci.*, 42: 17-23. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1991.tb00087.x>

Vaughan, D., MacDonald, I.R., 1976. Some effects of humic acid on cation uptake by parenchyma tissue. *Soil Biology & Biochemistry* 8, 415–42. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90043-2](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90043-2)

Wang, J., Wu, J., Lu, J., y, Yuan, G. 2020. Effects of leonardite on the coastal saline soil improvement, *Chemistry and Ecology*, DOI: <https://doi.org/10.1080/02757540.2020.1787997>

Whitaker, T. y Ryder, E. J. 1964. La lechuga y su producción. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Servicio de Investigaciones Agrícolas, Centro Regional de Ayuda Técnica, Agencia para el Desarrollo Internacional, México, 53 pp.

Zhang, J. M., Xing, S. J., Sang, M. P., Ma, B. Y., Chu, X. M., Liu, C.S. Effect of humic acid on poplar physiology and biochemistry properties and growth under different water level. *J. Soil Water Conserv.*, 6 (2010), p. 042.



# 3. Capítulo 3: Ácidos húmicos y su efecto sobre los contenidos de metales pesados en suelo y en hojas de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

## 3.1 Resumen

Esta investigación evaluó el efecto de la aplicación de ácidos húmicos (AH) extraídos de Leonardita, sobre los contenidos de plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd) y níquel (Ni) en un suelo Humic Haplustands y en hojas de lechuga en la Sabana de Bogotá. Se empleó un diseño de medidas repetidas asociado a un diseño completamente al azar, con cuatro tratamientos, como factor entre-sujetos: testigo 0 l ha<sup>-1</sup> (T0); 20 l ha<sup>-1</sup> (T20); 40 l ha<sup>-1</sup> (T40) y 60 l ha<sup>-1</sup> (T60), cuatro repeticiones y como componente intra-sujetos, dos ciclos de producción. Los datos se analizaron mediante estadística univariada y multivariada. Los resultados de la aplicación al suelo de AH extraídos de Leonardita, mostraron tendencia a aumentar los contenidos de metales pesados en el suelo y a disminuir su acumulación en las hojas de lechuga, en al menos uno de los ciclos; para el primer ciclo los únicos elementos que dieron diferencias estadísticas significativas en el suelo fueron Cd y Ni, y, en el segundo ciclo Pb, Cr y Ni; en planta las diferencias estadísticas significativas se dieron para Ni en los dos ciclos y Cd para el segundo ciclo, siendo T60 el que obtuvo el mayor contenido de metales pesados en suelo y el menor en hojas de lechuga. Se concluye que la aplicación de AH extraídos de Leonardita, permitió que se incrementaran los contenidos de metales pesados en el suelo y disminuyeran su acumulación en hojas de lechuga en al menos uno de los ciclos con la dosis más alta, obteniéndose la respuesta más clara para Ni.

**Palabras clave:** sustancias orgánicas, contaminación, hortalizas

## 3.2 Abstract

This research evaluated the effect of the application of humic acids (HA) extracted from Leonardite, on the contents of lead (Pb), chromium (Cr), cadmium (Cd) and nickel (Ni) in a soil Humic Haplustands and in leaves of lettuce of Sabana de Bogotá. A repeated measures design associated with a completely randomized design, with four treatments, was used as a between-subject factor: control 0 l ha<sup>-1</sup> (T0); 20 l ha<sup>-1</sup> (T20); 40 l ha<sup>-1</sup> (T40) and 60 l ha<sup>-1</sup> (T60), four repetitions and as an intra-subjects component, two production cycles. The data were analyzed using univariate and multivariate statistics. The results of the application to the soil of HA extracted from Leonardite, showed a tendency to increase the content of heavy metals in soil and to decrease their accumulation in lettuce leaves, in at least one of the cycles; for the first cycle, the only elements that gave significant statistical differences in the soil were Cd and Ni, and, in the second cycle, Pb, Cr and Ni; in plant, significant statistical differences occurred for Ni in the two cycles and Cd for the second cycle, being T60 the one that obtained the highest content of heavy metals in soil and the lowest in lettuce leaves. It is concluded that the application of HA extracted from Leonardite allowed the content of heavy metals in the soil to increase and to decrease their accumulation in lettuce leaves in at least one of the cycles with the highest dose, obtaining the clearest answer for Ni.

**Keywords:** organic substances, pollution, vegetables

## 3.3 Introducción

Los metales pesados son contaminantes importantes del suelo que pueden ser aportados de forma natural a través de la roca madre, o por acciones antrópicas, como, por ejemplo, la utilización de aguas contaminadas en labores agrícolas (Montenegro, 2002). En los cultivos de hortalizas de la Sabana de Bogotá, el empleo de aguas contaminadas provenientes del río Bogotá, favorecen la acumulación de metales pesados, como el As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn y de sustancias orgánicas e inorgánicas potencialmente tóxicas (Montenegro, 2002). Estas condiciones favorecen procesos de adsorción, desorción o complejación, los cuales influirán sobre la biodisponibilidad de dichos contaminantes (García *et al.*, 2002). La biodisponibilidad de los metales pesados

puede darse de dos formas: afectando las propiedades del suelo e incidiendo en el desarrollo de las plantas que crecen en dicho suelo, ya sea inhibiendo su desarrollo o siendo absorbidos y acumulados en sus tejidos, para pasar posteriormente a la cadena trófica generando consecuencias nocivas para la salud humana y animal (García *et al.*, 2002). La lechuga es una de las hortalizas que acumula mayores niveles de metales pesados, superando, en algunos casos, la concentración máxima permitida por la norma de la Unión Europea y el Ministerio de Salud y Protección colombiano (EC, 2006; Miranda *et al.*, 2008; MinSalud, 2013).

Los metales pesados más comunes en suelos contaminados, en orden de abundancia, son Pb, Cr, Cd y Ni (USEPA, 1996; Wuana y Okieimen, 2011).

El Cd es uno de los tres metales pesados más tóxicos y no se conoce función biológica esencial. En sus compuestos, Cd es un ion divalente Cd (II) y se encuentra debajo del Zn en la tabla periódica y tienen una similitud química, lo que puede explicar, en parte, su potencial tóxico y que sea absorbido con facilidad por las plantas (Campbel, 2006).

Por su parte, el Ni es un elemento de transición que, en suelos de pH bajo, existe en forma de ion níquel, Ni (II). En soluciones ligeramente alcalinas, precipita como hidróxido de níquel Ni (OH)<sub>2</sub>, un compuesto estable. En condiciones muy oxidantes y alcalinas, el níquel existe en forma de óxido de níquel-níquel estable, Ni<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Pourbaix, 1974).

La absorción y acumulación de metales pesados están asociados a un efecto no tóxico sobre la planta, lo que le permite pasar a la cadena trófica y generar no solo problemas de contaminación sino de toxicidad a otros seres vivos como los animales y el hombre (Campbel, 2006), por eso, ha sido necesario generar investigaciones con el empleo de productos que ayuden a disminuir su absorción y acumulación en las plantas, dentro de esos productos se encuentran los AH derivados de la Leonardita. La Leonardita es una forma oxidada de lignitos de carbón que ha sido utilizada en los últimos años para la extracción de AH; es un material complejo constituido predominantemente de carbono (55%) y materiales húmicos (carboxilos, hidroxilos y carbonilos) (Schwarzenbach *et al.*, 1993; Sugier *et al.*, 2013).

Los AH extraídos de Leonardita tienen gran capacidad para disminuir la fitodisponibilidad y absorción de elementos como el Cd y Ni, a través de mecanismos de formación de complejos estables con estos elementos (Cortes *et al.*, 2016; Meng *et al.*, 2017; Ondrasek

*et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018). Cortés *et al.*, (2015), determinaron que la absorción de los metales pesados Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en AH extraídos de muestras de Leonardita española presenta un comportamiento lineal en función de la dosis, ajustándose al modelo de isotermas de Freundlich y mostrando un orden de preferencia en selectividad de absorción de Cd>Pb>Cu>Ni>Zn. Cortés *et al.*, (2016) concluyeron que la aplicación de AH de Leonardita redujo la movilidad de Ni, Cu, Zn y Cd en suelos Andisoles y Vertisoles. Meng *et al.* (2017) usaron AH derivados de Leonardita en tres tipos de suelos contaminados con Cd: franco limoso (1.33 mg kg<sup>-1</sup> de Cd), franco limoso arcilloso (6.57 mg kg<sup>-1</sup> Cd), y franco arenoso (2.63 mg kg<sup>-1</sup> Cd) concluyendo que estas sustancias tienen una baja CMC (Concentración crítica de micelas), es decir, una alta eficacia de lavado y una gran capacidad para adsorber Cd reduciendo su concentración en 41.6, 36.8 y 74.9%, correspondientemente para cada suelo. Ondrasek *et al.* (2018) realizaron un estudio para caracterizar los efectos de diferentes concentraciones de AH (0, 15, 75, 150 y 225 mg l<sup>-1</sup>) sobre la absorción de metales traza en rábano (*Raphanus sativus* L.), demostrando que la aplicación de estos AH disminuyó la acumulación total en la planta de Cu en un 73%, de Cd en un 39%, de Zn en un 29% y de Mn en un 22%, en comparación al tratamiento testigo. Yu *et al.* (2018) reportaron que la aplicación de AH- potásicos redujeron el contenido de Cd en un 88% en plántulas de arroz en comparación con el tratamiento control.

El efecto de la aplicación de ácidos húmicos extraídos de Leonardita en la absorción de metales pesados en lechuga no se ha evaluado, pero si se ha realizado con otras fuentes de materia orgánica, como, por ejemplo, la realizada por Ruíz (2011) quién evaluó el efecto de la incorporación de compost, antes del trasplante, en la absorción de Cd en un cultivo de lechuga regado con aguas contaminadas del río de Bogotá. La aplicación de compost disminuyó la concentración de Cd en vástago fresco 0.18, 0.50 y 0.19 mg kg<sup>-1</sup> para los 32, 39 y 46 días después del trasplante (ddt), correspondientemente, en comparación con el tratamiento testigo.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de AH extraídos de Leonardita sobre los contenidos de Pb, Cr, Cd, Ni en el suelo y en un cultivo de lechuga de la Sabana de Bogotá.

## 3.4 Materiales y métodos

### 3.4.1 Descripción del sitio

La investigación se llevó a cabo en un área de un cultivo comercial de lechuga ubicada en el municipio de Mosquera, Cundinamarca en las coordenadas 4°41'26.6"N 74°12'31.6"W con una temperatura entre los 13.3 ° C y los 14° C, y una precipitación promedio mensual entre los 16 mm y los 104 mm (IDEAM, 2019).

### 3.4.2 Descripción del suelo

El suelo está clasificado como Humic Haplustands, derivado de mantos de ceniza volcánica sobre depósitos clásticos hidrogénicos, tiene un grado evolutivo moderado (IGAC, 2000; IGAC, 2017), y morfológicamente presenta una distribución de horizontes Ap (0-25 cm), A2 (25-48 cm), Bw1 (48-75 cm), Bw2 (75-93 cm) y C (93- X cm) (Anexo A). El horizonte Ap se caracteriza por tener textura franco-arcillosa, estructura granular y densidad aparente de 0.76 g cm<sup>3</sup>, algunas de sus características químicas iniciales para cada ciclo se muestran en la tabla 3-1.

**Tabla 3-1:** Análisis químico de suelo inicial para cada ciclo

Parámetro	pH	C.E	C.O	CICE	K Int	Ca Int	Mg Int	Na Int	Fe	Mn	Cu	Zn	B	P	S
Unidad		dS m <sup>-1</sup>	%			cmol kg <sup>-1</sup>						mg kg <sup>-1</sup>			
Ciclo 1	5.8	1.21	4.17	19.95	0.55	14	3.96	1.44	124	69	0.66	86	1.3	157	117
Ciclo 2	5.72	1.67	5.8	21.54	1.07	14.5	4.15	1.82	128	63	0.69	84	1.13	205	138

### 3.4.3 Establecimiento experimental

Se llevaron a cabo dos experimentos, cada uno correspondiente a un ciclo de cultivo de 75 días, el primero de ellos entre los meses de agosto y octubre del 2018; y el segundo entre diciembre de 2018 y febrero de 2019. Se sembró lechuga de la variedad Batavia con una densidad de siembra de 96000 plantas ha<sup>-1</sup>. La fertilización del cultivo se realizó con base a los requerimientos nutricionales (107 kg N ha<sup>-1</sup>, 48 kg P ha<sup>-1</sup>, 102 kg K ha<sup>-1</sup>, 26 kg Ca ha<sup>-1</sup>, 7.5 kg Mg ha<sup>-1</sup>, 3.8 kg S ha<sup>-1</sup> y 0.3 kg B ha<sup>-1</sup>) (Noreña *et al.*, 2014), ajustada con el análisis inicial de suelos (Tabla 3-1) y distribuida en dos aplicaciones, la primera a los 5 ddt y la segunda a los 30 ddt, usando como fertilizante una fuente comercial de mezcla física, de fórmula 12-27-13-2(MgO)-1(S), más urea, sulfato de potasio y nitrato de calcio con boro (15-0-0-26CaO-0.3B). Se realizó aplicación de riego teniendo en cuenta

capacidad de campo del suelo. Las demás labores agronómicas (control de malezas, control de plagas y enfermedades) se realizaron de manera similar al cultivo comercial dentro del cual se encontraba el ensayo.

#### **3.4.4 Diseño experimental y tratamientos**

Se empleó un diseño de medidas repetidas con el componente de factores entre-sujetos asociado a un diseño completamente al azar, con cuatro tratamientos: testigo con 0 l ha<sup>-1</sup> (T0), 20 l ha<sup>-1</sup> (T20), 40 l ha<sup>-1</sup> (T40) y 60 l ha<sup>-1</sup> (T60) y cuatro repeticiones, el ciclo como componente intra-sujetos. Cada repetición correspondió a 625 m<sup>2</sup>. El producto utilizado en el experimento fue un concentrado soluble que aporta 0.696 kg m<sup>-3</sup> de AH extraídos de Leonardita de origen español. Según análisis de composición reportado en etiqueta el producto aporta adicionalmente 0.172 kg m<sup>-3</sup> de K<sub>2</sub>O, 0.9 kg m<sup>-3</sup> de carbono orgánico, 0.07 kg m<sup>-3</sup> de Cu, 0.2 kg m<sup>-3</sup> de Zn, 0.0070 kg m<sup>-3</sup> de Cd, 0.025 kg m<sup>-3</sup> de Ni, 0.045 kg m<sup>-3</sup> de Pb, 0.07 kg m<sup>-3</sup> de Cr y 0.0004 kg m<sup>-3</sup> de Hg. Se realizó una aplicación en drench del producto a los 15 ddt con un volumen de agua de 320 l ha<sup>-1</sup>.

#### **3.4.5 Muestreo y análisis de suelos**

Para la evaluación de propiedades químicas en el suelo se realizaron cuatro muestreos, uno inicial antes de la aplicación de los tratamientos para cada ciclo cuyos resultados se observan en la Tabla 1, y a los 30, 50 y 70 ddt. Se tomaron muestras de suelo por cada unidad experimental, para un total de 16 muestras por muestreo. Cada muestra correspondió a 500 gramos de suelo tomados a una profundidad entre los 0-20 cm, fueron transportadas en bolsas plásticas y llevadas el mismo día a análisis para el procesamiento colectivo en el laboratorio. Se secaron en horno a una temperatura de 70° C hasta peso constante y se tamizaron en malla 2 mm, para obtener la fracción de tierra fina. Se determinó la concentración de Pb, Cr, Cd y Ni con el método Agua regia (NTC 5167) con valoración por espectrofotometría de absorción atómica- HG (EPA 200.9).

#### **3.4.6 Muestreo y análisis de tejido foliar**

Para la evaluación de la concentración de metales pesados en hoja de lechuga, se realizaron tres muestreos a los 30, 50 y 70 ddt, correspondientes a las etapas fenológicas

de la lechuga V8, CRE1 (60% de la formación) y MC (madurez comercial) (Huerres y Caraballo, 1988). Se tomaron muestras de hojas que acababan de alcanzar la madurez en 15 plantas entre las 6:00 am y las 8:00 am por cada réplica de cada tratamiento, para un total de 16 muestras por muestreo (Hue *et al.*, 2000). Cada muestra correspondió a 300 gramos de hojas extraídos de las plantas de la zona media de cada bloque, fueron transportadas en bolsas de papel y llevadas al laboratorio para su procesamiento. Se secaron en horno a una temperatura de 50° C hasta peso constante y se molió el material. Se determinó la concentración de Pb, Cr, Cd y Ni en agua regia (HCl: HNO<sub>3</sub>) y se dio la valoración por espectrofotometría de absorción atómica (NTC 5167, 2004).

### **3.4.7 Análisis estadístico y procesamiento de datos**

Se obtuvieron promedios para cada una de las respuestas en cada nivel de los factores inter e intra-sujetos para los contenidos de los elementos en suelo y en hojas. Los contenidos de los elementos totales en suelo y en hojas se analizaron empleando un análisis univariado y multivariado, este último, ajustado a partir de un diseño de medidas repetidas, usando el tratamiento como el factor entre sujetos y el ciclo como factor intra-sujetos. Estos resultados se complementaron con un análisis de perfiles, una técnica de estadística multivariante que es equivalente al análisis multivariado de varianza (MANOVA) para tratamientos con medidas repetidas (Bulut y Desjardins, 2018).

Los datos fueron procesados por el programa SAS University Edition (SAS Institute, Inc.) para el análisis univariado y multivariante con diseño en medidas repetidas. El software R se utilizó para el análisis de perfiles.

## **3.5 Resultados y discusión**

### **3.5.1 Contenidos de Pb, Cr, Cd y Ni en el suelo**

Según el análisis de perfiles, se observó que, tanto para el primer ciclo como para el segundo, las siguientes variables respuesta no tienen efecto tiempo- tratamiento: Cr, Cd y Ni, por lo cual, se analizaron univariadamente. Para el caso del Pb, esta interacción tiempo-tratamiento se dio en el segundo ciclo, pero no para el primero, por lo que, su análisis se realizó multivariadamente.

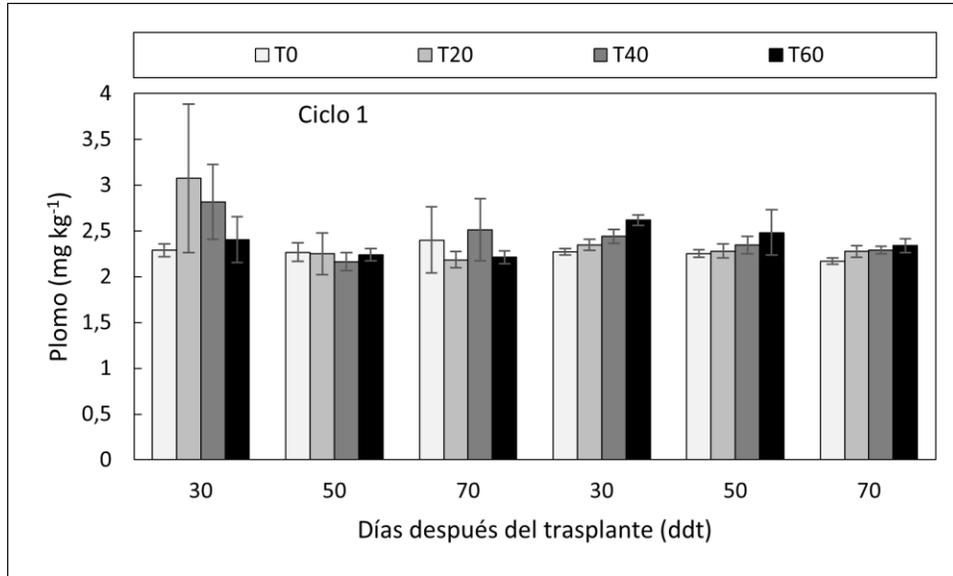
El análisis univariado mostró para el primer ciclo diferencias significativas por tratamiento ( $p < 0.05$ ) para Cd y Ni, pero no para Pb y Cr. Para el segundo ciclo los elementos que presentaron diferencias significativas por acción de los tratamientos fueron Cr y Ni, pero no Cd. Los rangos en los cuales estuvieron los elementos por ciclo se presentan en la tabla 3-2.

**Tabla 3-2:** Valores mínimos y máximos para cada elemento en cada ciclo

	Ciclo 1				Ciclo 2			
	Pb	Cr	Cd	Ni	Pb	Cr	Cd	Ni
	mg kg <sup>-1</sup>				mg kg <sup>-1</sup>			
<b>Mín</b>	2.07	10	3.25	23	2.13	11	3.30	23
<b>Máx</b>	4.20	14	4.23	43	2.76	16	4.22	42

En Colombia, en la actualidad no se cuenta con criterios y estándares de calidad para metales pesados en suelos agrícolas (Rueda *et al.*, 2011); sin embargo, en diferentes regiones del mundo se han propuesto valores de referencia a partir de los niveles de fondo de las concentraciones totales de cada elemento. En Estados Unidos, por ejemplo, la USEPA elaboró en 1996 el documento Soil Screening Guidance donde establecieron los niveles de fondo y el estudio de toxicidad de metales pesados en las personas y el medio ambiente (Sanchez, 2003). El promedio de Pb en el suelo fue de 2.40 y 2.34 mg kg<sup>-1</sup>, para el primer y el segundo ciclo, correspondientemente; valor inferior al contenido normal (10 mg kg<sup>-1</sup>) según la USEPA (1996) y al rango de valores de referencia mundial (10- 84 mg kg<sup>-1</sup>) reportado por McBride (1994).

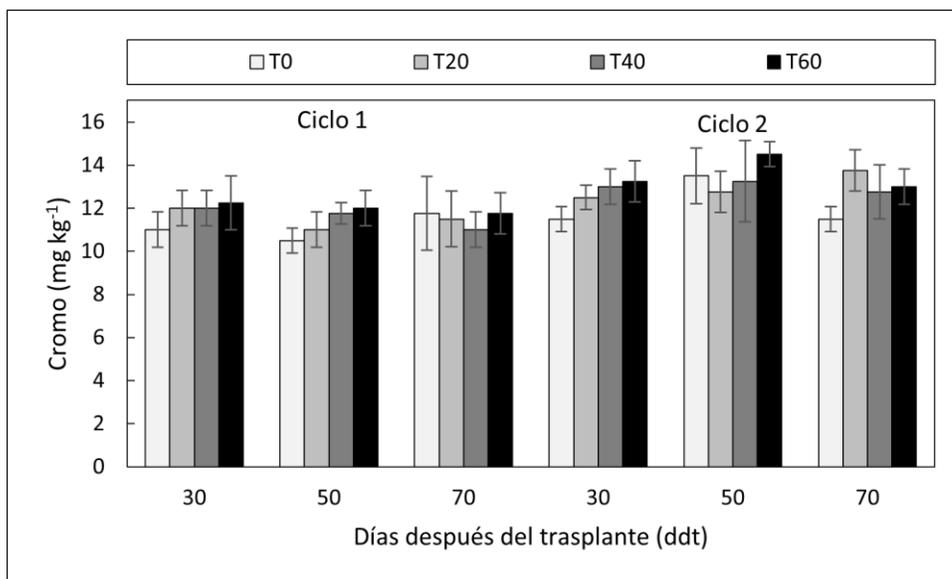
En la figura 3-1 se muestra el efecto de la aplicación de los AH en el contenido de Pb en el suelo. Para el primer ciclo no se observa el efecto de la aplicación de AH, pero para el segundo ciclo el contenido de Pb es directamente proporcional a la dosis de ácidos húmicos aplicadas, es decir, entre mayor fue la dosis mayor fue el contenido de Pb en el suelo. Para el segundo ciclo, el análisis multivariante mostró diferencias significativas entre T0 con T60 y entre T20 con T60. El T60 obtuvo 13.27, 9.16 y 7.15% más contenido de Pb en el suelo en comparación a T0, a los 30, 50 y 70 ddt, correspondientemente.



**Figura 3-1:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Pb en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

Según la USEPA (1996) el rango normal de contenido de Cr en el suelo es 0.1- 0.5 mg kg<sup>-1</sup> y el rango tóxico está entre 5 y 30 mg kg<sup>-1</sup>, en el suelo donde se realizó la investigación se detectaron valores promedios de 11.54 y 12.94 mg kg<sup>-1</sup>, para el primer y el segundo ciclo, correspondientemente.

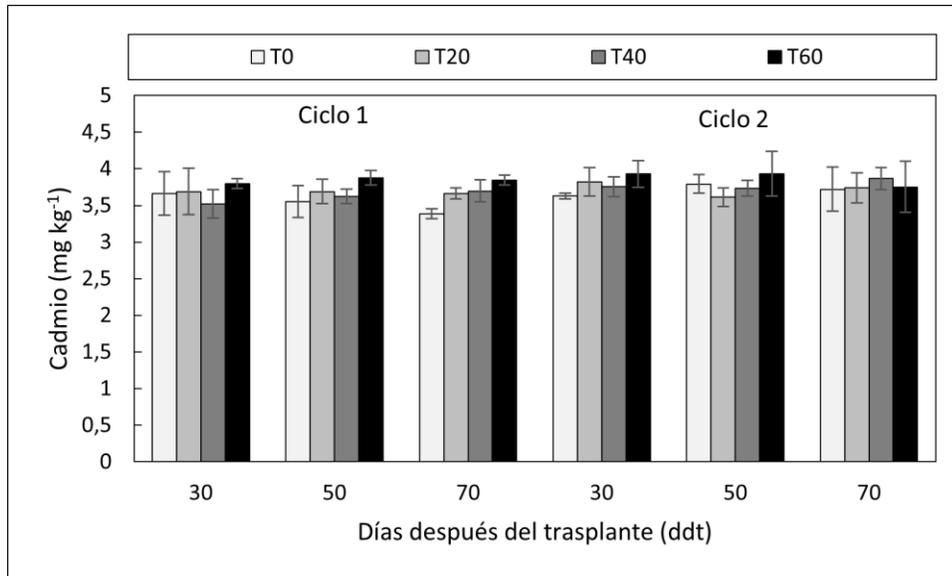
En la figura 3-2 se muestra el efecto de la aplicación de los AH en el contenido de Cr en el suelo. Para el primer ciclo no se observa el efecto de la aplicación de AH, pero para el segundo ciclo el contenido de Cr es directamente proporcional a la dosis de ácidos húmicos aplicadas, es decir, entre mayor fue la dosis mayor fue el contenido de Cr en el suelo, evidenciándose, según el análisis univariado, diferencia significativa entre T0 (12.16 mg Cr kg<sup>-1</sup>) y T60 (13.58 mg Cr kg<sup>-1</sup>). El T60 obtuvo 13.20, 6.89 y 11.53% más contenido de Cr en el suelo en comparación al tratamiento testigo, a los 30, 50 y 70 ddt, correspondientemente.



**Figura 3-2** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Cr en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

El promedio mundial de Cd en el suelo, según McBride (1994), está entre 0.06 y 1.1 mg kg<sup>-1</sup>, valor inferior a lo encontrado en esta investigación donde se detectaron valores promedios de 3.67 mg kg<sup>-1</sup> para el primer ciclo y 3.77 mg kg<sup>-1</sup> para el segundo ciclo, similares a los reportados por Ruíz (2011) en un suelo también de la Sabana de Bogotá.

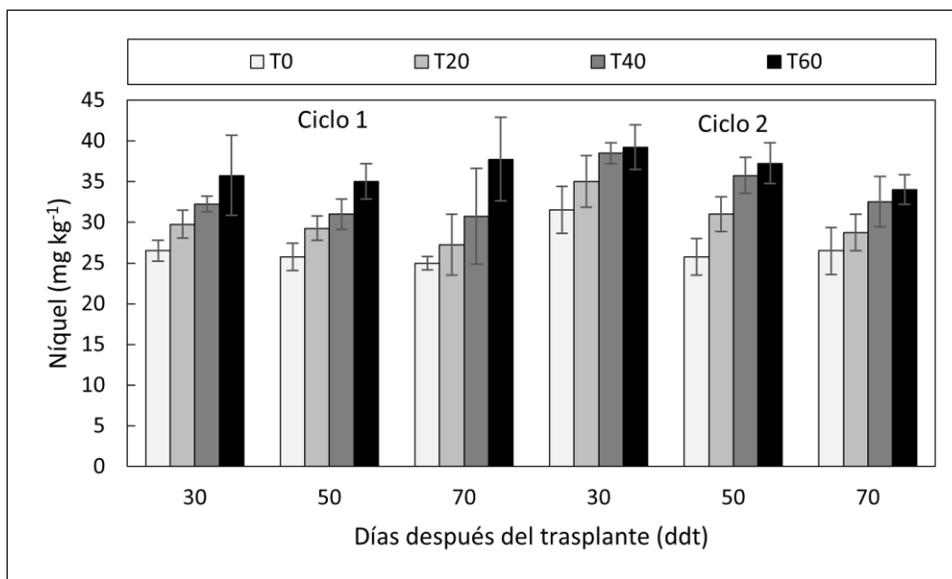
En la figura 3-3 se evidencia, como en el primer ciclo, el contenido de Cd en el suelo aumentó con la aplicación de AH, evidenciándose, según el análisis univariado, diferencia significativa ( $p$ -valor=0.0006) entre T0 (3.53 mg Cd kg<sup>-1</sup>) y T60 (3.84 mg Cd kg<sup>-1</sup>) y, con  $p$ -valor de 0.0143 entre T40 (3.61 mg Cd kg<sup>-1</sup>) y T60. El T60 obtuvo 3.47, 8.45 y 11.94% más contenido de Cd en el suelo en comparación a T60, a los 30, 50 y 70 ddt correspondientemente. Para el segundo ciclo no se observa una tendencia, ya que, por ejemplo, para los muestreos a los 30 y 70 ddt, se observa un aumento en el contenido de Cd en el suelo, no proporcional a la dosis de AH, pero para el muestreo realizado a los 50 ddt T0 tiene mayor contenido de Cd en comparación a T20 y T40.



**Figura 3-3:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Cd en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

El contenido promedio de Ni fue de 30.50 mg kg<sup>-1</sup> para el primer ciclo y de 32.98 mg kg<sup>-1</sup> para el segundo, valores que se encuentran dentro del rango de toxicidad (10- 100 mg kg<sup>-1</sup>) reportado para suelos por la USEPA (1996).

En la figura 3-4 se evidencia que el contenido de Ni es directamente proporcional a la dosis de AH aplicadas, es decir, entre mayor fue la dosis mayor fue el contenido de Ni en el suelo. El contenido de Ni del T60 fue en promedio 28.69 y 24.22% mayor en comparación al T0, para el ciclo 1 y ciclo 2, correspondientemente.



**Figura 3-4:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Ni en el suelo para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

La mayor retención de Pb, Cr, Cd y Ni en el suelo por la adición de AH, se debe a que las sustancias húmicas derivadas de Leonardita, tienen una alta concentración de grupos carboxilo y grupos hidroxilo fenólicos que tiende a formar complejos estables con estos metales (Tan, 2014). Con los AH de Leonardita se da un incremento de los sitios de intercambio (Janoš *et al.*, 2010), lo cual se asocia a la adsorción a las cargas negativas superficiales de dichos ácidos, generadas por la “desprotonación” progresiva y creciente de sus grupos carboxílicos e hidroxílicos (Cortes *et al.*, 2016).

El efecto de la aplicación de AH sobre la concentración de Ni, tuvo una tendencia clara en ambos ciclos, en comparación a los demás elementos (Pb, Cr y Cd), lo que podría deberse principalmente a que la complejación de los metales con los ácidos húmicos, tienen un carácter selectivo en función del tipo de metal, por ejemplo, el Cd es uno de los elementos que presenta mayor factor de movilidad, en comparación a otros metales pesados y su dinámica en el suelo es más compleja (Janoš *et al.*, 2010).

La complejación metal- AH está fuertemente afectada por el pH, relacionándose directamente con la labilidad del complejo. La constante de estabilidad (log K) para los diferentes complejos de metal + AH, se refiere al grado de asociación entre las dos especies implicadas en el estado de equilibrio, cuanto mayor es la asociación, mayor la estabilidad del compuesto (Meng, 2017). Estos resultados concuerdan con lo reportado

por Pandey *et al.* (2000), quienes demostraron que el complejo Ni- AH es más estable que el complejo Cd- AH.

La estabilidad de los complejos formados con ácidos húmicos se incrementa con el aumento de pH, debido al aumento en la ionización de los grupos funcionales, por ejemplo, Chakraborty (2010) realizó un diagrama esquemático de la estabilidad del complejo Cd- AH a diferentes pH, a pH 5, las moléculas de ácido húmico se agregan debido a la neutralización de cargas negativas por  $H^+$ , en tanto que el Cd sigue libre en la solución facilitando una mayor movilidad. A pH 6, el ácido húmico se desagrega en moléculas más pequeñas, generando mayor disponibilidad de sitios complejos para que los iones  $Cd^{2+}$  se unan y disminuya el coeficiente medio de difusión; a pH 7, el ácido húmico no se desagrega, sin embargo, el Cd forma complejos inertes. Si tenemos en cuenta el pH del suelo para la presente investigación (5.8 para el primer ciclo y 5.72 para el segundo ciclo), es posible que se hayan favorecido las condiciones para que el Cd formara estos complejos con los AH (Chakraborty, 2010).

El efecto observado del aumento del contenido Ni proporcional a la dosis de aplicación de los AH, puede estar relacionado con el aumento de los sitios de unión del metal (Li *et al.* 2013).

La movilización de los metales pesados en el suelo depende de las características físicas, químicas y biológicas de este, además de la naturaleza de la contaminación (origen de los metales y forma de deposición) y las condiciones medioambientales (precipitación y temperatura) (Sauquillo *et al.*, 2003). La diferencia de los resultados encontrados para los elementos Pb, Cr y Cd pudieron ser influenciados por el factor precipitación, ya que, para el primer ciclo el promedio fue de 42.65 mm mientras que para el segundo fue de 29.62 mm, siendo enero uno de los meses que presentó menores lluvias (0.4 mm).

### **3.5.2 Contenido de Pb, Cr, Cd y Ni en tejido foliar**

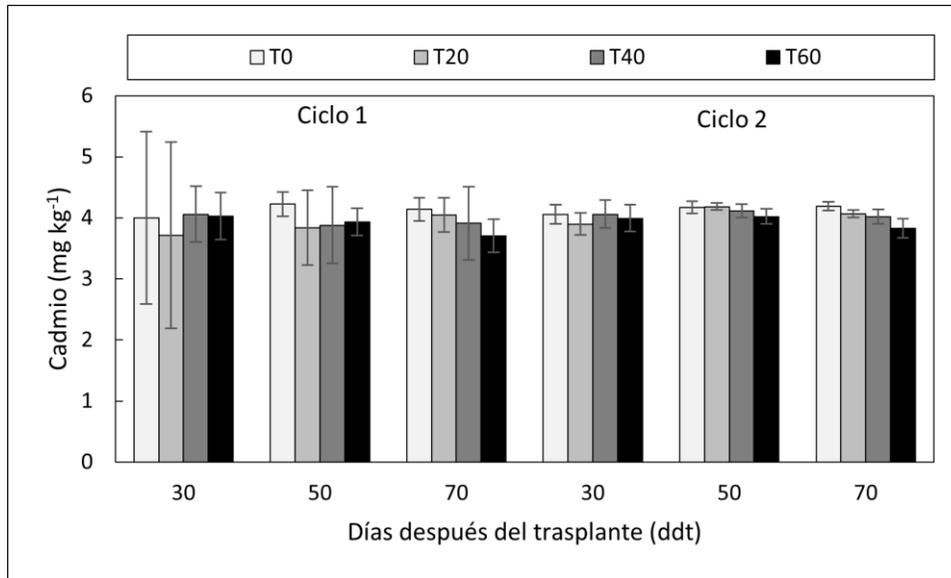
Los contenidos de Pb y Cr en hojas no fueron detectables por el método empleado para su determinación. Según el análisis de perfiles se observó que, tanto para el primer ciclo como para el segundo, el contenido de Cd y Ni en tejido vegetal no tiene efecto del tiempo, por lo cual se analizaron univariadamente.

El análisis mostró para el primer ciclo efecto significativo de los tratamientos solo para Ni ( $p$ -valor=0.0001). Para el segundo ciclo, los elementos que presentaron diferencias significativas por acción de los tratamientos fueron Cd con  $p$ -valor de 0.0188 y Ni con  $p$ -valor de 0.0001. Los rangos para el primer ciclo fueron de 3.70 a 4.22 mg kg<sup>-1</sup> para Cd y de 0.69 a 1.45 mg kg<sup>-1</sup> para Ni, para el segundo ciclo de 3.83 a 4.19 mg kg<sup>-1</sup> para Cd y de 0.72 a 1.24 mg kg<sup>-1</sup> para Ni.

El contenido promedio de Cd para el primer ciclo fue de 3.96 mg kg<sup>-1</sup> y para el segundo ciclo de 4.05 mg kg<sup>-1</sup>, superando el nivel máximo (0.050 mg kg<sup>-1</sup>) establecido para hortalizas de hoja por el Ministerio de Salud y Protección colombiano (MinSalud, 2013) y por la Unión Europea (0.20 mg kg<sup>-1</sup>) (EC, 2006).

En la figura 3-5 se observa que en el muestreo a los 70 ddt, para ambos ciclos, la dosis de AH es inversamente proporcional al contenido de Cd en hojas, es decir, a mayor dosis menor contenido. El contenido del Cd en las hojas a los 70 ddt para T0 fue 10.51% y 8.54% mayor en comparación al tratamiento T60, para el primer y segundo ciclo, correspondientemente.

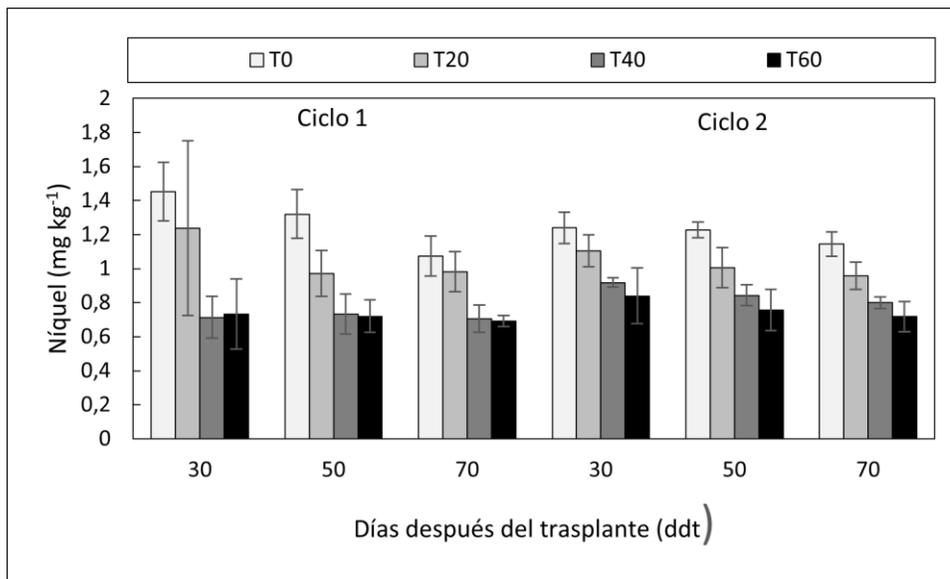
La reducción de la concentración de Cd encontrada en lechuga con la aplicación de AH en el ciclo 2 (figura 3-5) está de acuerdo con numerosos estudios que han demostrado el efecto reductor de las sustancias húmicas en la acumulación de Cd en plantas (Juang *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2003) dada su característica absorbente para formar complejos con Cd y así reducir su biodisponibilidad a las plantas (Simmler *et al.* 2013; Shan *et al.* 2016). Los AH agregados a suelos contaminados con metales pesados modifican la asociación con los diferentes componentes edáficos, disminuyendo, en general, los factores de movilidad y se ha demostrado que la adición de estas sustancias disminuye la capacidad de lixiviación y de movilidad del Cd (Janoš *et al.*, 2010; Cortes *et al.*, 2016).



**Figura 3-5:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Cd en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

Actualmente no existe ninguna legislación colombiana o de la Unión Europea (UE) sobre los valores máximos de Ni en los alimentos, aunque el Consejo de Europa publicó una guía práctica sobre metales y aleaciones utilizadas en materiales y artículos en contacto con alimentos, en el que establecía un límite de liberación específico (SRL, por sus siglas en inglés) para Ni de  $0.14 \text{ mg kg}^{-1}$  de alimento (EDQM, 2013); en esta investigación los valores promedio de Ni fueron de  $0.94$  y  $0.96 \text{ mg kg}^{-1}$ , para el primer y el segundo ciclo, correspondientemente.

En la figura 3-6 se observa que el contenido de Ni es inversamente proporcional a la dosis de AH aplicadas, es decir, entre mayor fue la dosis menor fue el contenido de Ni encontrado en las hojas. El contenido de Ni de T0 fue en promedio  $43.53$  y  $35.96\%$  mayor en comparación al tratamiento de  $60 \text{ l ha}^{-1}$ , para el ciclo 1 y ciclo 2, correspondientemente.



**Figura 3-6:** Efecto de los tratamientos con AH sobre el contenido de Ni en hojas para dos ciclos de producción de lechuga Batavia.

Los resultados obtenidos en los contenidos de Ni en hojas muestran un efecto evidente de la reducción de la disponibilidad de este elemento con la aplicación de AH, aunque Zeledón (2005) demostró que la Leonardita tiene una mayor selectividad de absorción para metales como el Cu y el Cd probablemente debido al mayor potencial iónico de estos iones metálicos.

Con los resultados obtenidos en esta investigación se comprueba el efecto potencial de AH extraídos de Leonardita como adsorbentes de Pb, Cr, Cd y Ni, justificado en que son propensos a formar complejos con estos elementos, evidenciados en el aumento en la concentración de Cd y Ni en el suelo (figuras 3-1, 3-2, 3-3 y 3-4) y la reducción de su disponibilidad para la planta (figuras 3-5 y 3-6); y además demostrada en estudios como el de Wang *et al.* 2012 donde la capacidad máxima de adsorción fue de 129 mg g<sup>-1</sup> siendo hasta unos cientos de veces más alto que los de los minerales, que incluyen zeolita, calcita, dolomita, caolinita, lodo rojo y turmalina de tamaño nanométrico.

La Leonardita a partir de la cual se extraen estos ácidos húmicos contienen concentraciones de metales pesados por debajo de los límites permisibles en enmiendas de suelo para uso agrícola en EE. UU., UE y China (Luo *et al.* 2014) y para los establecidos para abonos orgánico minerales líquidos en Colombia (NTC 5167, 2004) por lo que, sería

importante tener este tipo de productos como alternativas para el manejo de metales pesados en el suelo.

### 3.6 Conclusión

La aplicación de AH extraídos de Leonardita incrementó el contenido de los metales pesados evaluados en el suelo y disminuyó su acumulación en el cultivo de lechuga, a través de la formación de complejos organominerales que disminuyeron su disponibilidad, pero favoreció la adecuada y completa nutrición de la planta.

### 3.7 Bibliografía

Bulut, O, y Desjardins, C. D. 2018. Profile R: Profile Analysis of Multivariate Data in R. R Package Versión 0.3-5. Consultado: 15/10/2020. En: <https://CRAN.R-project.org/package=profileR>

Campbell, P. G. 2006. Cadmium-A priority pollutant," Environmental Chemistry, vol. 3, no. 6, pp. 387–388, 2006.

Chakraborty, P. 2010. Study of cadmium–humic interactions and determination of stability constants of cadmium–humate complexes from their diffusion coefficients obtained by scanned stripping voltammetry and dynamic light scattering techniques. Analytica Chimica Acta 659 (2010) 137–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.11.043>

Cortés, L. E., Bravo, I., Martín, F. J., y Menjivar, J. C. 2015. Adsorción de metales pesados en andisoles, vertisoles y ácidos húmicos. Acta Agronómica, vol. 64, núm. 1, enero-marzo, 2015, pp. 61-71. Universidad Nacional de Colombia- Palmira, Colombia. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n1.43677>

Cortés, L. E., Bravo, I., Martín, F. J., y Menjivar, J. C. 2016. Extracción secuencial de metales pesados en dos suelos contaminados (Andisol y Vertisol) enmendados con ácidos húmicos. Acta Agronomía (2016) 65 (3) p 232-238. DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v65n3.44485>.

EC (Commission Regulation). 2006. Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Official Journal of the European Union L 364/5. Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006. Consultado: 27/10/2020. En: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2006/1881/oj>

EDQM (European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare). 2013. Executive summary: Metals and alloys used in food contact materials and articles- The Council of Europe Guidelines in a nutshell. Consultado: 27/10/2020. En: [https://www.edelstahl-rostoffrei.de/fileadmin/user\\_upload/ISER/downloads/CoE-Guidelines\\_EN.pdf](https://www.edelstahl-rostoffrei.de/fileadmin/user_upload/ISER/downloads/CoE-Guidelines_EN.pdf)

García, C., Moreno, J. L., Hernández, M.T., Polo, A. 2002. Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. Ciencia y Medio Ambiente- CCMA-CSIC 2002. 125-138.

Hue, N. V., Uchida, R., Ho M. C. 2000. Sampling and analysis of soils and plant tissues: How to take representative samples, how the samples are tested. In: Silva JA, Uchida RS, editors. Plant nutrient management in Hawaii's soils: approaches for tropical and subtropical agriculture. Honolulu (HI): University of Hawaii. p. 23-30.

Huerres, P.C., y N.L. Caraballo. 1988. Horticultura. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba.

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2019. Datos de temperatura y precipitación- Estación Tibaitata, Mosquera, Cundinamarca.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2000. Estudio general de suelos y zonificación de tierras de Cundinamarca.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2017. Mapas de Suelos del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Cundinamarca.

Janoš. P. Vávrová. J. Herzogová. L. & Pilarová. V. 2010. Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: A sequential extraction study. Geoderma, 159 (3-4), 335 - 341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.009>.

Juang, K. W., Ho, P. C., Yu, C. H., 2012. Short-term effects of compost amendment on the fractionation of cadmium in soil and cadmium accumulation in rice plants. Environ. Sci. Pollut. Res. 19, 1696–1708. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0684-0>.

Li Y, Lei M, Chen T, Yang J, Zhou X, Wang Y (2013) Optimized EDTA washing procedure to decontaminate heavymetals from soils in iron and steel works sites. Asian J Chem 25:37–41

Luo, F., Song, J., Xia, W.X., Dong, M.G., Chen, M.F., Soudek, P. 2014. Characterization of contaminants and evaluation of the suitability for land application of maize and sludge biochars. Environ Sci Pollut Res 21:8707–8717. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2797-8>.

McBride, M.B. 1994. Environmental Chemistry of Soils. Oxford University Press, New York. 406p.

Meng, F., Yuan, G., Wei, J., Bi, D., Ok, S. Y., y Wang, H. 2017. Humic substances as a washing agent for Cd-contaminated soils. Chemosphere 181 (2017) 461-467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.127>.

MinSalud (Ministerio de Salud y Protección Social- República de Colombia). 2013. Resolución 004506 de 2013- Por la cual se establecen los niveles máximos de contaminantes en los alimentos destinados al consumo humano. Consultada: 5 de febrero de 2020. En:

<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-4506-de-2013.pdf>

Miranda, D., Carranza, C., Rojas, C. A., Jerez, C. M., Fischer, G., y Zurita, J. 2008. Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. Revista Colombia de Ciencias Hortícolas- Vol. 2- No. 2- pp. 180-191, 2008. DOI: <https://doi.org/10.17584/rcch.2008v2i2.1186>.

Montenegro, R. O. 2002. Contaminación química de suelos y cultivos. Estrategias para la productividad de los suelos agrícolas. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Capítulo Cundinamarca, Bogotá.

NTC (Norma técnica colombiana) 5167. 2004. Productos para la industria agrícola. productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).

Ondrasek, G., Rengel, Z. y Romić D. 2018. Humic acids decrease uptake and distribution of trace metals, but not the growth of radish exposed to cadmium toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 151 (2018) 55-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.055>.

Pandey, A, Pandey, S., y Misra, V. 2000. Constants of Metal-Humic Acid Complexes and Its Role in Environmental Detoxification. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 47, 195-200 (2000) Environmental Research, Section B. doi:10.1006/eesa.2000.1947.

Pourbaix, M. 1974. Atlas of Electrochemical Equilibria, Pergamon Press, New York, NY, USA, 1974, Translated from French by J.A. Franklin.

Rueda, G., Rodríguez, J. A., y Madriñán, R. 2011. Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia. *Acta Agronómica*. 60 (3) 2011, p 203-218.

Ruíz, J. 2011. Evaluación de tratamientos para disminuir Cadmio en lechuga (*Lactuca sativa* L.) regada con agua del río Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* - Vol. 5 - No. 2 - pp. 233-243, 2011. DOI: <https://doi.org/10.17584/rcch.2011v5i2.1270>

Sánchez, M.I. 2003. Determinación de metales pesados en suelos de Medina del Campo – Valladolid: contenidos extraíbles, niveles de fondo y de referencia. Tesis de Doctorado. Universidad de Valladolid. Valladolid. España. 298p.

Schwarzenbach, R.P., Gschwend, P.M. e Imboden, D.M., 1993. *Environmental Organic Chemistry*. John Wiley & Sons Inc.

Shan, H., Su, S.M., Liu, R.L., Li, S.T. (2016) Cadmium availability and uptake (*Raphanus sativus*) by radish grown in soils applied with wheat straw or composted pig manure. *Environ Sci Pollut R* 23:15208–15217. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6464-0>.

Simmler, M., Ciadamidaro, L., Schulin, R., Madejon, P., Reiser, R., Clucas, L., Weber, P., Robinson, B. 2013. Lignite reduces the solubility and plant uptake of cadmium in pasturelands. *Environ Sci Technol* 47:4497–4504. DOI: <https://doi.org/10.1021/es303118a>.

Sugier, D., Kolodziej, B. y Bielinska, E. 2013. The effect of leonardite application on *Arnica montana* L. yielding and chosen chemical properties and enzymatic activity of the soil. *Journal of Geochemical Exploration* 129 (2013): 76-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.013>.

Tan, K.H., 2014. *Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies*, second ed. CRC Press, Boca Raton, FL. Tandy, S., Bossart, K., Mueller, R., Ritschel, J., Hauser, L.

USEPA (1996) *Soil screening guidance: technical background document*. EPA/540/ R-95/128. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, p A-5.

USEPA, 1996. Report: recent Developments for In Situ Treatment of Metals contaminated Soils, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response.

Wang, C.P., Wang, B.L., Liu, J.T., Sun, H.W., Wu, J.Z. 2012. Adsorption of Cd(II) from acidic aqueous solutions by tourmaline as a novel material. *Chinese Sci Bull* 57:3218–3225. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5341-6>.

Wuana, R. A., y Okieimen, F. E. 2011. Review Article: Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *International Scholarly Research Network ISRN Ecology* Volume 2011, Article ID 402647, 20 pages. DOI: <https://doi.org/doi:10.5402/2011/402647>

Yu, Y., Wan, Y. N., Wang, Q., Li, H. F., 2017. Effect of humic acid-based amendments with foliar application of Zn and Se on Cd accumulation in tobacco. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 138, 286–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.01.011>.

Yu, Y., Wan, Y., Camara, A. Y., y Li, Huafen. 2018. Effects of the addition and aging of humic acid-based amendments on the solubility of Cd in soil solution and its accumulation in rice. *Chemosphere* 196 (2018) 303-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.002>.

Zeledon, Z., Lao-Luque, C. y Solé-Sardans M. 2005. Nickel and copper removal from aqueous solution by an immature coal (leonardite): effect of pH, contact time and water

---

hardness. J Chem Technol Biotechnol 80:649–656 (2005). DOI: <https://doi.org/10.1002/ictb.1243>.

Zhu, Y. G., Zhao, Z. Q., Li, H. Y., Smith, S. E., Smith, F. A., 2003. Effect of zinc-cadmium interactions on the uptake of zinc and cadmium by winter wheat (*Triticum aestivum*) grown in pot culture. B. Environ. Contam. Tox. 71, 1289–1296. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-003-0230-y>.



## **4. Conclusiones y recomendaciones**

### **4.1 Conclusión**

La aplicación de AH extraídos de Leonardita, tuvo efectos positivos sobre la mayoría de los parámetros evaluados en esta investigación, mejorando las condiciones químicas del suelo, la absorción de nutrientes, el rendimiento de la lechuga y reduciendo la absorción de metales pesados por parte de la planta.

### **4.2 Recomendaciones**

Se plantea la necesidad de repetir el ensayo con más de dos ciclos productivos, tratando de controlar de manera más eficiente las condiciones de humedad del suelo, a partir de los riegos programados, sobre todo en épocas de baja precipitación, en razón a que en la presente investigación la aplicación de riegos extras en el período seco no se evidenció en su respuesta en suelo y planta.



# A. Anexo A: Localización de la zona de estudio

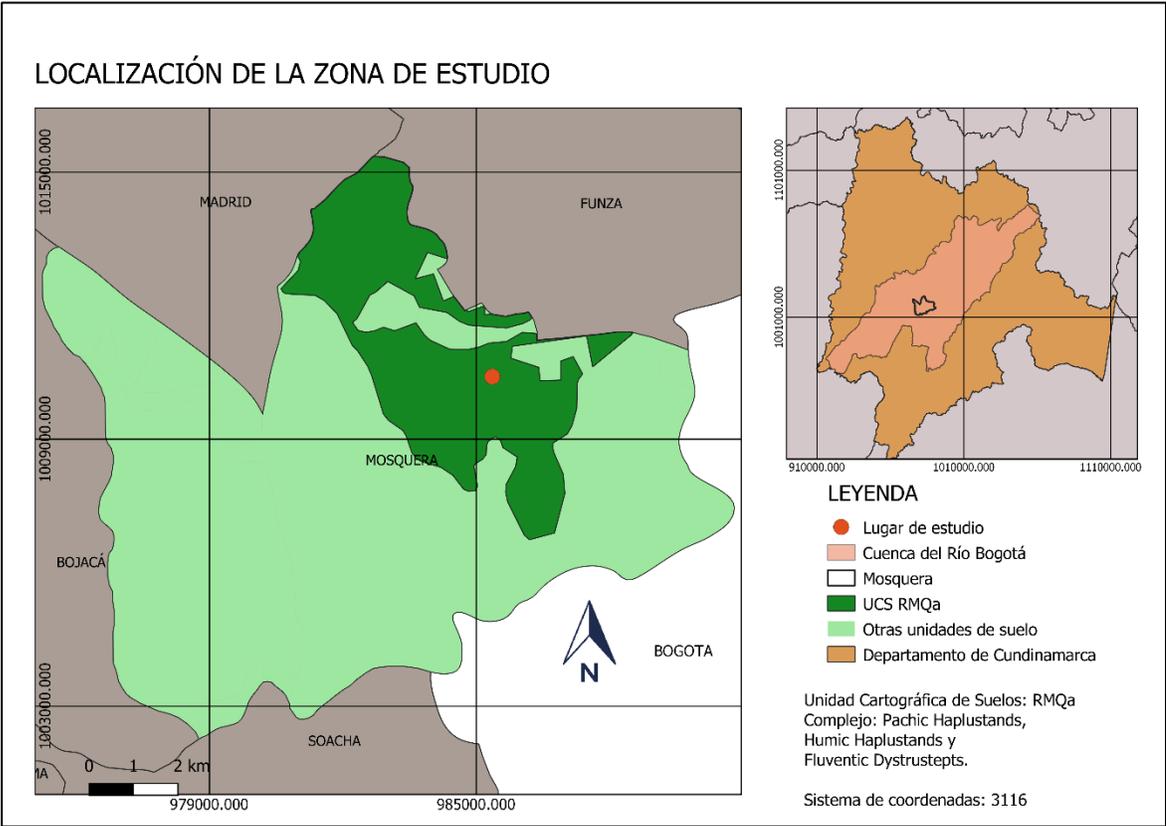


Figura A-1: Localización de la zona de estudio



## B. Anexo B: Distribución de los tratamientos

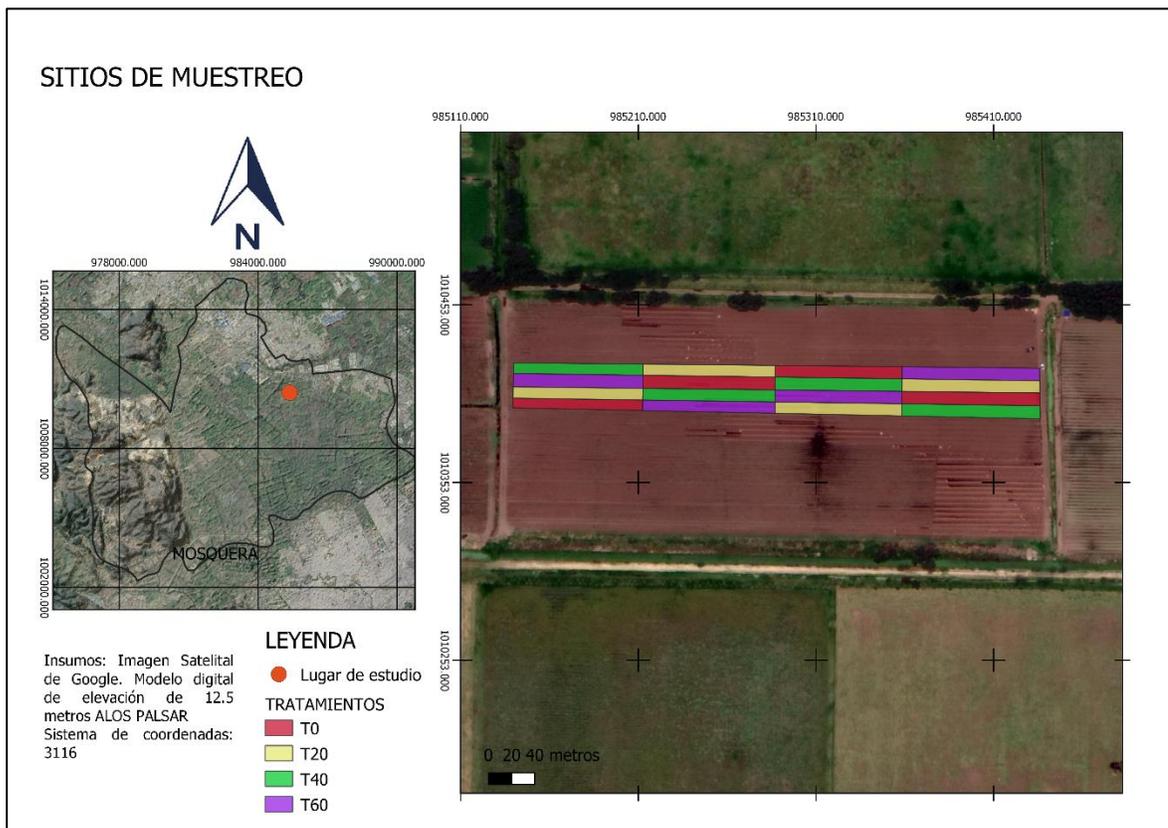
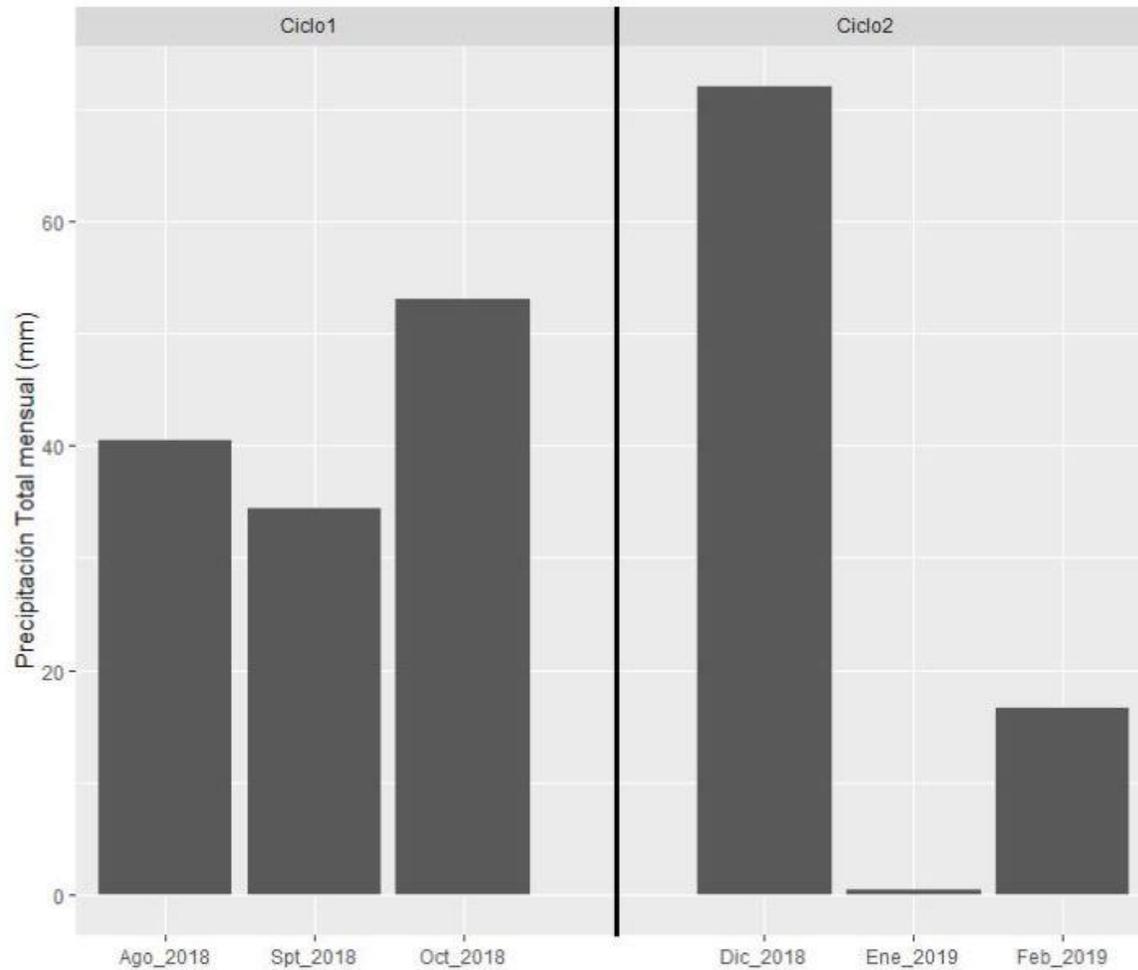


Figura B-1: Distribución de los tratamientos

## C. Anexo C: Condiciones climáticas en la investigación



**Figura C-1:** Precipitación total mensual para cada ciclo de producción

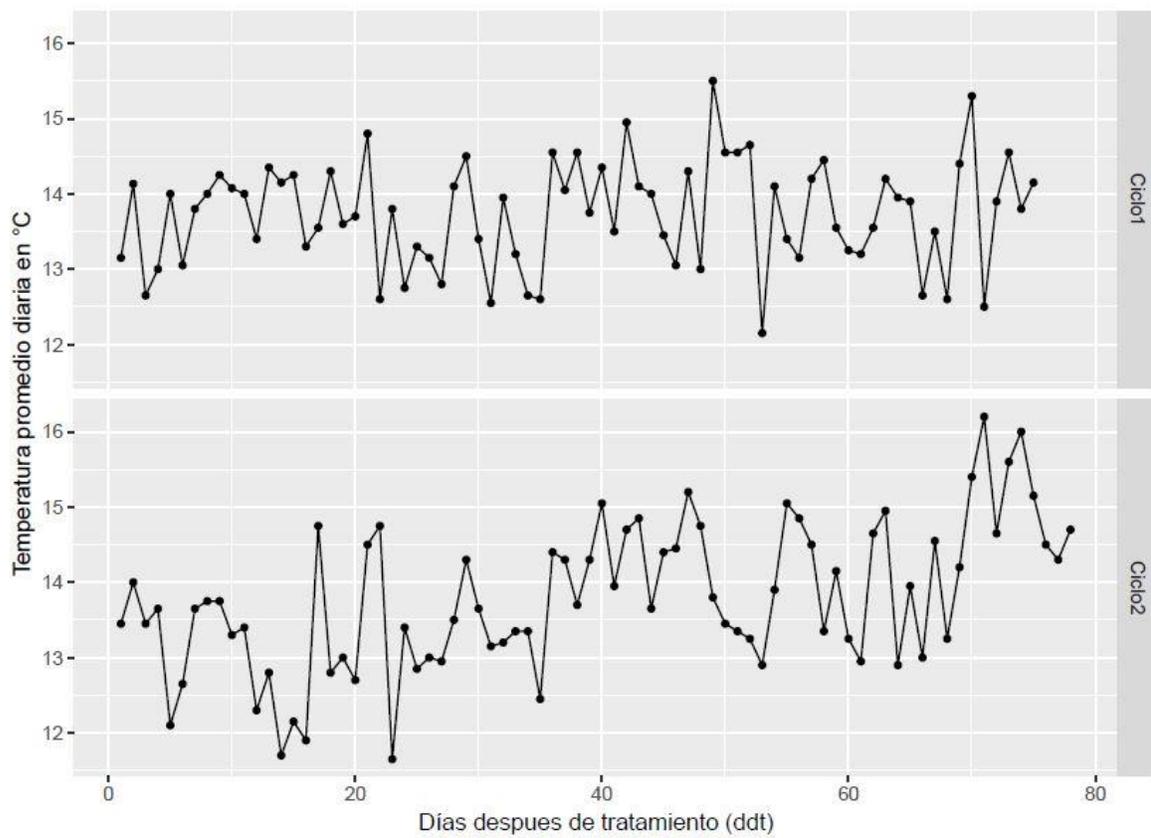


Figura C-2: Temperatura promedio diaria para cada ciclo de producción

## D. Anexo D: Tablas resumen del análisis de perfiles

**Tabla D-1:** Resumen del análisis de perfiles para variables del capítulo 1

Ciclo	Parámetro	Paralelismo	Coincidencia	Horizontalidad	Significado
Ciclo 1	pH	0.36	0.304	0.0007	Igualdad de tratamientos
	CO	0.5	0.0005		Diferencia de Tratamientos
	CICE	0.08	0.0034		Diferencia de Tratamientos
	P	0.002	0.00195	0.0001	Interacción tiempo*Tratamiento
	K	0.58	0.003	0.0001	Diferencia de Tratamientos
	Ca	0.32	0.0275		Diferencia de Tratamientos
	Mg	0.37	0.144	0.001	Igualdad de tratamientos
	S	0.06	0.0001	0.0001	Diferencia de Tratamientos
	B	0.9	0.9	0.0001	Igualdad de tratamientos
	Mn	0.59	0.221	0.46	Igualdad de Tratamientos sin efecto tiempo
	Zn	0.84	0.00282	0.0003	Diferencia de Tratamientos
	Cu	0.97	0.326	0.66	Igualdad de Tratamientos sin efecto tiempo
	Fe	0.4	0.0146	0.32	Diferencia de Tratamientos
Ciclo2	pH	0.14	0.323	0.144	Igualdad de Tratamientos sin efecto tiempo
	CO	0.2	0.0001		Diferencia de Tratamientos
	CICE	0.89	0.0276	0.044	Diferencia de Tratamientos
	P	0.13	0.087	0.11	Igualdad de Tratamientos sin efecto tiempo
	K	0.63	0.0001	0.054	Diferencia de Tratamientos
	Ca	0.92	0.84	0.371	Igualdad de Tratamientos sin efecto tiempo
	Mg	0.52	0.772	0.17	Igualdad de Tratamientos sin efecto tiempo
	S	0.17	0.637	0.03	Igualdad de tratamientos
	B	0.87	0.459	0.73	Igualdad de Tratamientos sin efecto tiempo
	Mn	0.65	0.00141	0.055	Diferencia de Tratamientos
	Fe	0.31	0.595	0.57	Igualdad de Tratamientos sin efecto tiempo
	Zn	0.26	0.0001	0.002	Diferencia de Tratamientos
	Cu	0.97	0.0001	0.05	Diferencia de Tratamientos

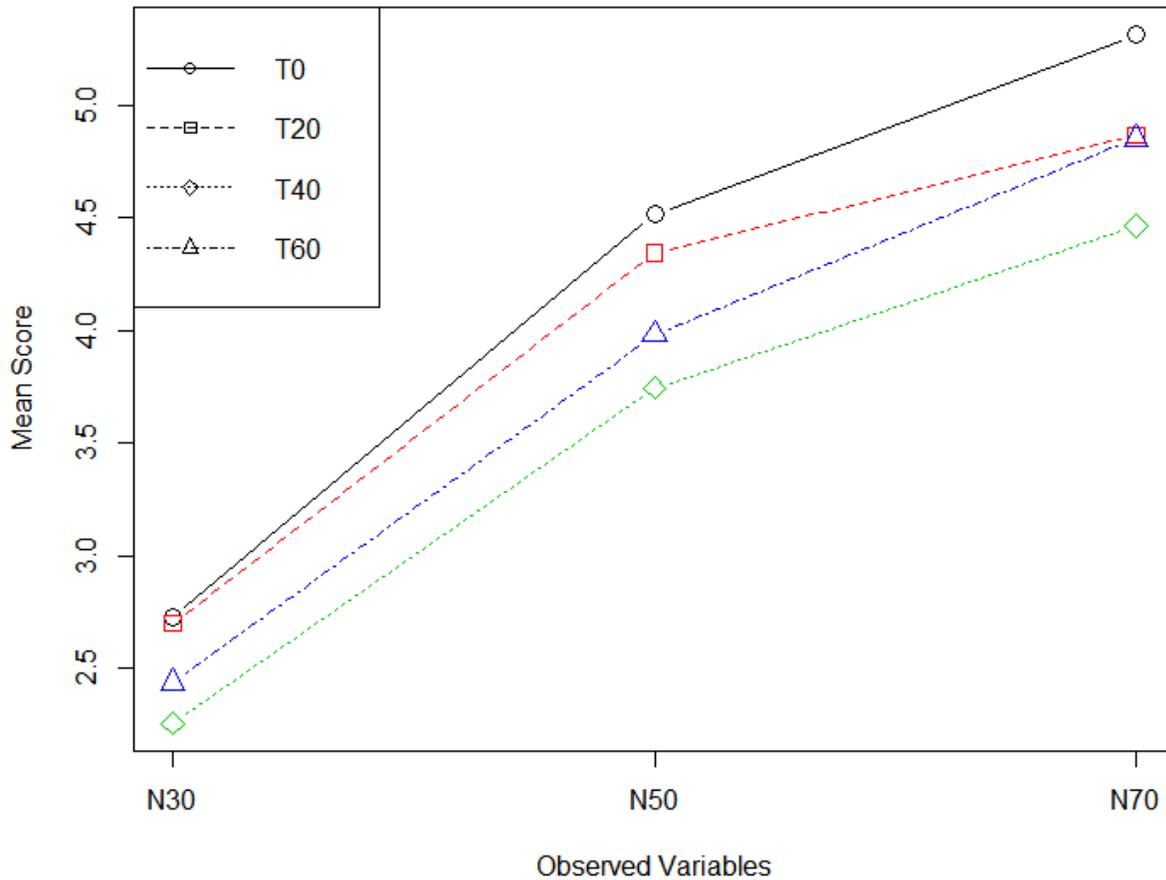
**Tabla D-2:** Resumen del análisis de perfiles para variables del capítulo 2

Ciclo	Nutriente	Paralelismo	Coincidencia	Horizontalidad	Significado
Ciclo 1	N	0.089	0.0235	<0.05	Diferencia de tratamientos
	P	0.4789	0.00972	<0.05	Igualdad de tratamientos
	K	0.7383	0.0022	<0.05	Diferencia de tratamientos
	Ca	0.681	0.000205	<0.05	Diferencia de tratamientos
	Mg	0.548	0.7	<0.05	Igualdad de tratamientos
	S	0.504	0.11	<0.05	Igualdad de tratamientos
	Fe	0.0003	<0.05	<0.05	Interacción tiempo*tratamiento
	Mn	0.99	0.0183	<0.05	Diferencia de tratamientos
	Cu	0.99	0.002	0.00003	Diferencia de tratamientos
	Zn	0.586	<0.05	<0.05	Diferencia de tratamientos
	B	0.807	0.001	<0.05	Diferencia de tratamientos
Ciclo 2	N	0.01	0.0007	<0.05	Interacción tiempo*tratamiento
	P	0.00387	0.22	0.00001	Interacción tiempo*tratamiento
	K	0.426	0.0001	<0.05	Diferencia de tratamientos
	Ca	0.586	0.863	<0.05	Igualdad de tratamientos
	Mg	0.975	0.499	<0.05	Igualdad de tratamientos
	S	0.586	0.815	<0.05	Igualdad de tratamientos
	Fe	0.00007	<0.05	<0.05	Interacción tiempo*tratamiento
	Mn	0.814	0.396	<0.05	Igualdad de tratamientos
	Cu	0.815	<0.05	<0.05	Diferencia de tratamientos
	Zn	0.112	<0.05	<0.05	Diferencia de tratamientos
	B	0.788	0.739	0.00002	Igualdad de tratamientos

**Tabla D-3:** Resumen del análisis de perfiles para variables del capítulo 3

Ciclo	Contenido	Paralelismo	Coincidencia	Horizontalidad	Significado	
Ciclo 1	Suelo	Pb	0.12	0.237	0.039	Igualdad de tratamientos
		Cr	0.48	0.33	0.21	Igualdad de Tratamientos sin efecto tiempo
		Cd	0.26	0.0231	0.62	Diferencia de Tratamientos
		Ni	0.9	0.0001	0.67	Diferencia de Tratamientos
	Planta	Cd	0.96	0.8	0.99	Igualdad de Tratamientos sin efecto tiempo
		Ni	0.27	0.0001	0.14	Diferencia de Tratamientos
Ciclo 2	Suelo	Pb	0.057	0.0001	0.0001	Interacción Tiempo*Tratamiento
		Cr	0.19	0.02	0.067	Diferencia de Tratamientos sin efecto tiempo
		Cd	0.17	0.372	0.94	Igualdad de Tratamientos sin efecto tiempo
		Ni	0.58	0.0001	0.0001	Diferencia de Tratamientos
	Planta	Cd	0.19	0.077	0.052	Igualdad de Tratamientos
		Ni	0.98	0.0001		Diferencia de Tratamientos

## E. Anexo E: Ejemplo de análisis de perfiles para la variable Nitrógeno foliar



**Figura E-1:** Análisis de perfiles para el contenido de N foliar en el primer ciclo

Data Summary:

	T0	T20	T40	T60
N30	2.7255	2.700	2.256	2.4375
N50	4.5175	4.345	3.745	3.9825
N70	5.3130	4.869	4.467	4.8510

Hypothesis Tests:

\$`Ho: Profiles are parallel`

	Multivariate Test	Statistic	Approx. F	num. df	den. df	p. value
1	wilks	0.3986959	2.140316	6	22	0.08918428
2	Pillai	0.6226488	1.808250	6	24	0.13993804
3	Hotelling-Lawley	1.4546408	2.424401	6	20	0.06327965
4	Roy	1.4168554	5.667422	3	12	0.01181194

\$`Ho: Profiles have equal levels`

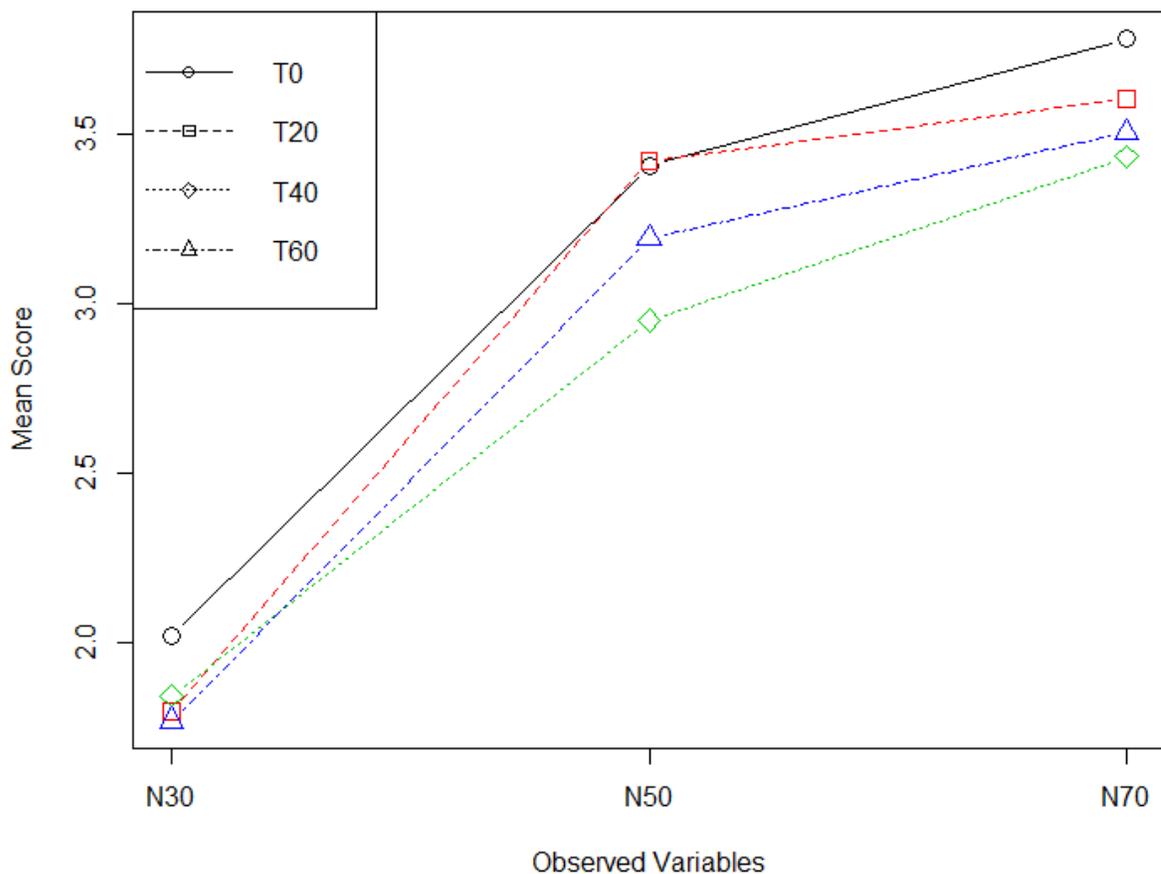
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
group	3	1.0636	0.3545	4.566	0.0235 *
Residuals	12	0.9317	0.0776		

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

\$`Ho: Profiles are flat`

	F	df1	df2	p-value
1	1742.303	2	11	1.730954e-14

Ciclo 2



**Figura E-2:** Análisis de perfiles para el contenido de N foliar en el segundo ciclo

Data Summary:

	T0	T20	T40	T60
N30	2.022300	1.798200	1.84410	1.769850
N50	3.406875	3.421875	2.95125	3.193125
N70	3.781200	3.604100	3.43390	3.505200

Hypothesis Tests:

\$`Ho: Profiles are parallel`

	Multivariate.Test	Statistic	Approx.F	num.df	den.df	p.value
1	wilks	0.2474762	3.703965	6	22	0.0107110670
2	Pillai	0.7692927	2.500327	6	24	0.0505725895
3	Hotelling-Lawley	2.9730333	4.955055	6	20	0.0029481238
4	Roy	2.9500644	11.800258	3	12	0.0006830113

\$`Ho: Profiles have equal levels`

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
group	3	0.24449	0.08150	18.98	7.53e-05 ***
Residuals	12	0.05154	0.00429		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

\$`Ho: Profiles are flat`

	F	df1	df2	p-value
1	1220.967	2	11	1.214473e-13

Obtenido en R-Studio: Package 'profileR' (Profile Analysis of Multivariate Data in R)

Función: pgb (Profile Analysis by Group: Testing Parallelism, Equal Levels, and Flatness)

Se tuvo en cuenta el estadístico de Wilks para la evaluación de hipótesis

## F. Anexo F: Ejemplo de análisis estadístico para la variable carbono orgánico para el primer ciclo

**Procedimiento GLM**

**Variable dependiente: CO\_30 CO\_30**

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
<b>Modelo</b>	3	8.99472500	2.99824167	13.21	0.0004
<b>Error</b>	12	2.72445000	0.22703750		
<b>Total corregido</b>	15	11.71917500			

R-cuadrado	Var Coef.	Raíz MSE	Media de CO_30
0.767522	7.185440	0.476485	6.631250

Origen	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
<b>Trat</b>	3	8.99472500	2.99824167	13.21	0.0004

Origen	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
<b>Trat</b>	3	8.99472500	2.99824167	13.21	0.0004

**Procedimiento GLM****Variable dependiente: CO\_50 CO\_50**

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
<b>Modelo</b>	3	6.21522500	2.07174167	9.22	0.0019
<b>Error</b>	12	2.69675000	0.22472917		
<b>Total corregido</b>	15	8.91197500			

R-cuadrado	Var Coef.	Raíz MSE	Media de CO_50
0.697402	8.257019	0.474056	5.741250

Origen	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
<b>Trat</b>	3	6.21522500	2.07174167	9.22	0.0019

Origen	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
<b>Trat</b>	3	6.21522500	2.07174167	9.22	0.0019

**Procedimiento GLM**

**Variable dependiente: CO\_70 CO\_70**

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
<b>Modelo</b>	3	5.38036875	1.79345625	6.57	0.0071
<b>Error</b>	12	3.27642500	0.27303542		
<b>Total corregido</b>	15	8.65679375			

R-cuadrado	Var Coef.	Raíz MSE	Media de CO_70
0.621520	9.867162	0.522528	5.295625

Origen	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
<b>Trat</b>	3	5.38036875	1.79345625	6.57	0.0071

Origen	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
<b>Trat</b>	3	5.38036875	1.79345625	6.57	0.0071

### Procedimiento GLM Análisis de medidas repetidas de la varianza

Información sobre el nivel de las medidas repetidas			
Variable dependiente	CO_30	CO_50	CO_70
Nivel de Time	1	2	3

Coeficientes de correlación parcial de la matriz SSCP de error / Prob >  r			
DF = 12	CO_30	CO_50	CO_70
CO_30	1.000000	0.507855 0.0764	0.689088 0.0092
CO_50	0.507855 0.0764	1.000000	0.626579 0.0219
CO_70	0.689088 0.0092	0.626579 0.0219	1.000000

Matriz SSCP de error E =		
Time_N representa el contraste entre el nivel n de Time y último		
	Time_1	Time_2
Time_1	1.8833	0.7317
Time_2	0.7317	2.2482

Coeficientes de correlación parcial de la matriz SSCP de error de las variables definidas por la transformación especificada / Prob >  r		
DF = 12	Time_1	Time_2
Time_1	1.000000	0.355599 0.2331
Time_2	0.355599 0.2331	1.000000

Test de esfericidad				
Variables	DF	Criterio de Mauchly	Chi-cuadrado	Pr > ChiSq
Variables transformadas	2	0.8667346	1.5732475	0.4554
Componentes ortogonales	2	0.9599717	0.4493665	0.7988

**Procedimiento GLM  
Análisis de medidas repetidas de la varianza**

Criterio de test MANOVA y estadísticos F exactos para la hipótesis de efecto no Time H = Tipo III Matriz SSCP para T. indeTime Matriz SSCP de error E =					
S=1 M=0 N=4.5					
Estadístico	Valor	Valor F	Num DF	Den DF	Pr > F
Lambda de Wilks	0.06173050	83.60	2	11	<.0001
Traza de Pillai	0.93826950	83.60	2	11	<.0001
Traza Hotelling-Lawley	15.19944865	83.60	2	11	<.0001
Raíz más grande de Roy	15.19944865	83.60	2	11	<.0001

Criterio de test MANOVA y aproximaciones para la hipótesis de efecto no Time*Trat H = Tipo III Matriz SSCP para Time*Trat Matriz SSCP de error E =					
S=2 M=0 N=4.5					
Estadístico	Valor	Valor F	Num DF	Den DF	Pr > F
Lambda de Wilks	0.65727698	0.86	6	22	0.5417
Traza de Pillai	0.37138219	0.91	6	24	0.5031
Traza Hotelling-Lawley	0.47782574	0.85	6	13.032	0.5566
Raíz más grande de Roy	0.35500113	1.42	3	12	0.2852
NOTA: El estadístico F para la raíz mayor de Roy es un límite superior.					
NOTA: El estadístico F para Lambda de Wilks es exacto.					

**Procedimiento GLM  
Análisis de medidas repetidas de la varianza  
Tests de hipótesis para efectos entre sujetos**

Origen	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Trat	3	20.10095625	6.70031875	12.50	0.0005
Error	12	6.43112500	0.53592708		

**Procedimiento GLM**  
**Análisis de medidas repetidas de la varianza**  
**Test de hipótesis univariante para efectos dentro del sujeto**

Origen	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F	Pr > Adj F	
						G - G	H-F-L
<b>Time</b>	2	14.79773750	7.39886875	78.35	<.0001	<.0001	<.0001
<b>Time*Trat</b>	6	0.48936250	0.08156042	0.86	0.5353	0.5325	0.5353
<b>Error(Time)</b>	24	2.26650000	0.09443750				

<b>Greenhouse-Geisser Epsilon</b>	0.9615
<b>Huynh-Feldt-Lecoutre Epsilon</b>	1.1412

**Procedimiento GLM**  
**Análisis de medidas repetidas de la varianza**  
**Análisis de varianza de las variables de contraste**

**Time\_N** representa el contraste entre el nivel n de Time y último

**Variable de contraste: Time\_1**

Origen	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
<b>Mean</b>	1	28.54230625	28.54230625	181.87	<.0001
<b>Trat</b>	3	0.63711875	0.21237292	1.35	0.3038
<b>Error</b>	12	1.88327500	0.15693958		

**Variable de contraste: Time\_2**

Origen	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
<b>Mean</b>	1	3.17730625	3.17730625	16.96	0.0014
<b>Trat</b>	3	0.45981875	0.15327292	0.82	0.5084
<b>Error</b>	12	2.24817500	0.18734792		

**Procedimiento GLM  
Medias de mínimos cuadrados  
Ajuste para comparaciones múltiples: Tukey**

Trat	LSMEAN CO_30	Número LSMEAN
T0	5.54250000	1
T20	6.38000000	2
T40	7.07500000	3
T60	7.52750000	4

Medias de cuadrados mínimos para el efecto Trat Pr >  t  para H0: MediaLS(i)=MediaLSn(j) Variable dependiente: CO_30				
i/j	1	2	3	4
1		0.1131	0.0032	0.0004
2	0.1131		0.2198	0.0233
3	0.0032	0.2198		0.5552
4	0.0004	0.0233	0.5552	

**Procedimiento Mixed**

Test de tipo 3 de efectos fijos				
Efecto	DF Num	Den DF	Valor F	Pr > F
Dia	2	36	30.62	<.0001
Trat	3	36	27.73	<.0001
Dia*Trat	6	36	0.34	0.9124

Medias de mínimos cuadrados							
Efecto	Trat	Dia	Estimación	Error estándar	DF	t valor	Pr >  t
Dia		30	6.6313	0.1229	36	53.96	<.0001
Dia		50	5.7413	0.1229	36	46.72	<.0001
Dia		70	5.2956	0.1229	36	43.10	<.0001
Trat	T0		4.9517	0.1419	36	34.90	<.0001
Trat	T20		5.6600	0.1419	36	39.89	<.0001
Trat	T40		6.2967	0.1419	36	44.38	<.0001
Trat	T60		6.6492	0.1419	36	46.86	<.0001
Dia*Trat	T0	30	5.5425	0.2458	36	22.55	<.0001
Dia*Trat	T20	30	6.3800	0.2458	36	25.96	<.0001
Dia*Trat	T40	30	7.0750	0.2458	36	28.79	<.0001
Dia*Trat	T60	30	7.5275	0.2458	36	30.63	<.0001
Dia*Trat	T0	50	4.9150	0.2458	36	20.00	<.0001
Dia*Trat	T20	50	5.4225	0.2458	36	22.06	<.0001
Dia*Trat	T40	50	6.0750	0.2458	36	24.72	<.0001
Dia*Trat	T60	50	6.5525	0.2458	36	26.66	<.0001
Dia*Trat	T0	70	4.3975	0.2458	36	17.89	<.0001
Dia*Trat	T20	70	5.1775	0.2458	36	21.07	<.0001
Dia*Trat	T40	70	5.7400	0.2458	36	23.36	<.0001
Dia*Trat	T60	70	5.8675	0.2458	36	23.87	<.0001

Diferencias de medias de mínimos cuadrados											
Efecto	Trat	Dia	Trat	Dia	Estimación	Error estándar	DF	t valor	Pr >  t	Ajuste	Adj P
Dia		30		50	0.8900	0.1738	36	5.12	<.0001	Tukey	<.0001
Dia		30		70	1.3356	0.1738	36	7.69	<.0001	Tukey	<.0001
Dia		50		70	0.4456	0.1738	36	2.56	0.0147	Tukey	0.0381
Trat	T0		T20		-0.7083	0.2007	36	-3.53	0.0012	Tukey	0.0061
Trat	T0		T40		-1.3450	0.2007	36	-6.70	<.0001	Tukey	<.0001
Trat	T0		T60		-1.6975	0.2007	36	-8.46	<.0001	Tukey	<.0001

**Procedimiento Mixed**

Diferencias de medias de mínimos cuadrados											
Efecto	Trat	Dia	Trat	Dia	Estimación	Error estándar	DF	t valor	Pr >  t	Ajuste	Adj P
Trat	T20		T40		-0.6367	0.2007	36	-3.17	0.0031	Tukey	0.0156
Trat	T20		T60		-0.9892	0.2007	36	-4.93	<.0001	Tukey	0.0001
Trat	T40		T60		-0.3525	0.2007	36	-1.76	0.0875	Tukey	0.3105
Dia*Trat	T0	30	T20	30	-0.8375	0.3476	36	-2.41	0.0212	Tukey	0.4255
Dia*Trat	T0	30	T40	30	-1.5325	0.3476	36	-4.41	<.0001	Tukey	0.0044
Dia*Trat	T0	30	T60	30	-1.9850	0.3476	36	-5.71	<.0001	Tukey	<.0001
Dia*Trat	T0	30	T0	50	0.6275	0.3476	36	1.81	0.0794	Tukey	0.8046
Dia*Trat	T0	30	T20	50	0.1200	0.3476	36	0.35	0.7319	Tukey	1.0000
Dia*Trat	T0	30	T40	50	-0.5325	0.3476	36	-1.53	0.1342	Tukey	0.9213
Dia*Trat	T0	30	T60	50	-1.0100	0.3476	36	-2.91	0.0062	Tukey	0.1815
Dia*Trat	T0	30	T0	70	1.1450	0.3476	36	3.29	0.0022	Tukey	0.0792
Dia*Trat	T0	30	T20	70	0.3650	0.3476	36	1.05	0.3006	Tukey	0.9951
Dia*Trat	T0	30	T40	70	-0.1975	0.3476	36	-0.57	0.5734	Tukey	1.0000
Dia*Trat	T0	30	T60	70	-0.3250	0.3476	36	-0.94	0.3560	Tukey	0.9982
Dia*Trat	T20	30	T40	30	-0.6950	0.3476	36	-2.00	0.0531	Tukey	0.6906
Dia*Trat	T20	30	T60	30	-1.1475	0.3476	36	-3.30	0.0022	Tukey	0.0780

### Procedimiento Mixed

Diferencias de medias de mínimos cuadrados											
Efecto	Trat	Dia	Trat	Dia	Estimación	Error estándar	DF	t valor	Pr >  t	Ajuste	Adj P
Dia*Trat	T60	30	T40	50	1.4525	0.3476	36	4.18	0.0002	Tukey	0.0084
Dia*Trat	T60	30	T60	50	0.9750	0.3476	36	2.81	0.0081	Tukey	0.2202
Dia*Trat	T60	30	T0	70	3.1300	0.3476	36	9.01	<.0001	Tukey	<.0001
Dia*Trat	T60	30	T20	70	2.3500	0.3476	36	6.76	<.0001	Tukey	<.0001
Dia*Trat	T60	30	T40	70	1.7875	0.3476	36	5.14	<.0001	Tukey	0.0005
Dia*Trat	T60	30	T60	70	1.6600	0.3476	36	4.78	<.0001	Tukey	0.0015
Dia*Trat	T0	50	T20	50	-0.5075	0.3476	36	-1.46	0.1529	Tukey	0.9419
Dia*Trat	T0	50	T40	50	-1.1600	0.3476	36	-3.34	0.0020	Tukey	0.0718
Dia*Trat	T0	50	T60	50	-1.6375	0.3476	36	-4.71	<.0001	Tukey	0.0019
Dia*Trat	T0	50	T0	70	0.5175	0.3476	36	1.49	0.1452	Tukey	0.9342
Dia*Trat	T0	50	T20	70	-0.2625	0.3476	36	-0.76	0.4550	Tukey	0.9997
Dia*Trat	T0	50	T40	70	-0.8250	0.3476	36	-2.37	0.0231	Tukey	0.4477
Dia*Trat	T0	50	T60	70	-0.9525	0.3476	36	-2.74	0.0095	Tukey	0.2481
Dia*Trat	T20	50	T40	50	-0.6525	0.3476	36	-1.88	0.0686	Tukey	0.7647
Dia*Trat	T20	50	T60	50	-1.1300	0.3476	36	-3.25	0.0025	Tukey	0.0874
Dia*Trat	T20	50	T0	70	1.0250	0.3476	36	2.95	0.0056	Tukey	0.1666

<b>Dia*Trat</b>	T20	50	T40	70	-0.3175	0.3476	36	-0.91	0.3671	Tukey	0.9985
<b>Dia*Trat</b>	T20	50	T60	70	-0.4450	0.3476	36	-1.28	0.2086	Tukey	0.9766
<b>Dia*Trat</b>	T40	50	T60	50	-0.4775	0.3476	36	-1.37	0.1780	Tukey	0.9613
<b>Dia*Trat</b>	T40	50	T0	70	1.6775	0.3476	36	4.83	<.0001	Tukey	0.0013
<b>Dia*Trat</b>	T40	50	T20	70	0.8975	0.3476	36	2.58	0.0140	Tukey	0.3260
<b>Dia*Trat</b>	T40	50	T40	70	0.3350	0.3476	36	0.96	0.3415	Tukey	0.9976
<b>Dia*Trat</b>	T40	50	T60	70	0.2075	0.3476	36	0.60	0.5542	Tukey	1.0000
<b>Dia*Trat</b>	T60	50	T0	70	2.1550	0.3476	36	6.20	<.0001	Tukey	<.0001
<b>Dia*Trat</b>	T60	50	T20	70	1.3750	0.3476	36	3.96	0.0003	Tukey	0.0153
<b>Dia*Trat</b>	T60	50	T40	70	0.8125	0.3476	36	2.34	0.0251	Tukey	0.4704
<b>Dia*Trat</b>	T60	50	T60	70	0.6850	0.3476	36	1.97	0.0565	Tukey	0.7087
<b>Dia*Trat</b>	T0	70	T20	70	-0.7800	0.3476	36	-2.24	0.0311	Tukey	0.5309
<b>Dia*Trat</b>	T0	70	T40	70	-1.3425	0.3476	36	-3.86	0.0004	Tukey	0.0196
<b>Dia*Trat</b>	T0	70	T60	70	-1.4700	0.3476	36	-4.23	0.0002	Tukey	0.0073
<b>Dia*Trat</b>	T20	70	T40	70	-0.5625	0.3476	36	-1.62	0.1143	Tukey	0.8909
<b>Dia*Trat</b>	T20	70	T60	70	-0.6900	0.3476	36	-1.99	0.0548	Tukey	0.6997
<b>Dia*Trat</b>	T40	70	T60	70	-0.1275	0.3476	36	-0.37	0.7159	Tukey	1.0000

<b>Dia*Trat</b>	T20	30	T0	50	1.4650	0.3476	36	4.22	0.0002	Tukey	0.0076
<b>Dia*Trat</b>	T20	30	T20	50	0.9575	0.3476	36	2.75	0.0092	Tukey	0.2417
<b>Dia*Trat</b>	T20	30	T40	50	0.3050	0.3476	36	0.88	0.3860	Tukey	0.9990
<b>Dia*Trat</b>	T20	30	T60	50	-0.1725	0.3476	36	-0.50	0.6227	Tukey	1.0000
<b>Dia*Trat</b>	T20	30	T0	70	1.9825	0.3476	36	5.70	<.0001	Tukey	<.0001
<b>Dia*Trat</b>	T20	30	T20	70	1.2025	0.3476	36	3.46	0.0014	Tukey	0.0538
<b>Dia*Trat</b>	T20	30	T40	70	0.6400	0.3476	36	1.84	0.0738	Tukey	0.7851
<b>Dia*Trat</b>	T20	30	T60	70	0.5125	0.3476	36	1.47	0.1490	Tukey	0.9381
<b>Dia*Trat</b>	T40	30	T60	30	-0.4525	0.3476	36	-1.30	0.2012	Tukey	0.9735
<b>Dia*Trat</b>	T40	30	T0	50	2.1600	0.3476	36	6.21	<.0001	Tukey	<.0001
<b>Dia*Trat</b>	T40	30	T20	50	1.6525	0.3476	36	4.75	<.0001	Tukey	0.0016
<b>Dia*Trat</b>	T40	30	T40	50	1.0000	0.3476	36	2.88	0.0067	Tukey	0.1920
<b>Dia*Trat</b>	T40	30	T60	50	0.5225	0.3476	36	1.50	0.1415	Tukey	0.9300
<b>Dia*Trat</b>	T40	30	T0	70	2.6775	0.3476	36	7.70	<.0001	Tukey	<.0001
<b>Dia*Trat</b>	T40	30	T20	70	1.8975	0.3476	36	5.46	<.0001	Tukey	0.0002
<b>Dia*Trat</b>	T40	30	T40	70	1.3350	0.3476	36	3.84	0.0005	Tukey	0.0207
<b>Dia*Trat</b>	T40	30	T60	70	1.2075	0.3476	36	3.47	0.0014	Tukey	0.0520
<b>Dia*Trat</b>	T60	30	T0	50	2.6125	0.3476	36	7.52	<.0001	Tukey	<.0001
<b>Dia*Trat</b>	T60	30	T20	50	2.1050	0.3476	36	6.06	<.0001	Tukey	<.0001

Trat	LSMEAN CO_50	Número LSMEAN
T0	4.91500000	1
T20	5.42250000	2
T40	6.07500000	3
T60	6.55250000	4

Medias de cuadrados mínimos para el efecto Trat Pr >  t  para H0: MediaLS(i)=MediaLSn(j) Variable dependiente: CO_50				
i/j	1	2	3	4
1		0.4596	0.0212	0.0018
2	0.4596		0.2606	0.0248
3	0.0212	0.2606		0.5088
4	0.0018	0.0248	0.5088	

Trat	LSMEAN CO_70	Número LSMEAN
T0	4.39750000	1
T20	5.17750000	2
T40	5.74000000	3
T60	5.86750000	4

**Procedimiento GLM**  
**Medias de mínimos cuadrados**  
**Ajuste para comparaciones múltiples: Tukey**

Medias de cuadrados mínimos para el efecto Trat Pr >  t  para H0: MediaLS(i)=MediaLSn(j)				
Variable dependiente: CO_70				
i/j	1	2	3	4
1		0.2044	0.0157	0.0086
2	0.2044		0.4551	0.2915
3	0.0157	0.4551		0.9852
4	0.0086	0.2915	0.9852	

## G. Anexo G: Resumen del análisis estadístico del peso promedio de lechuga

### Primer Ciclo

```
      T      P
Length:480   Min.   :277.0
Class :character 1st Qu.:313.0
Mode  :character Median :346.0
                        Mean  :343.7
                        3rd Qu.:375.0
                        Max.   :390.0
```

### Terms:

```
                T Residuals
Sum of Squares 409283.7 134185.2
Deg. of Freedom    3      476
```

Residual standard error: 16.78993  
Estimated effects may be unbalanced

```
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
T      3 409284 136428    484 <2e-16 ***
Residuals 476 134185    282
```

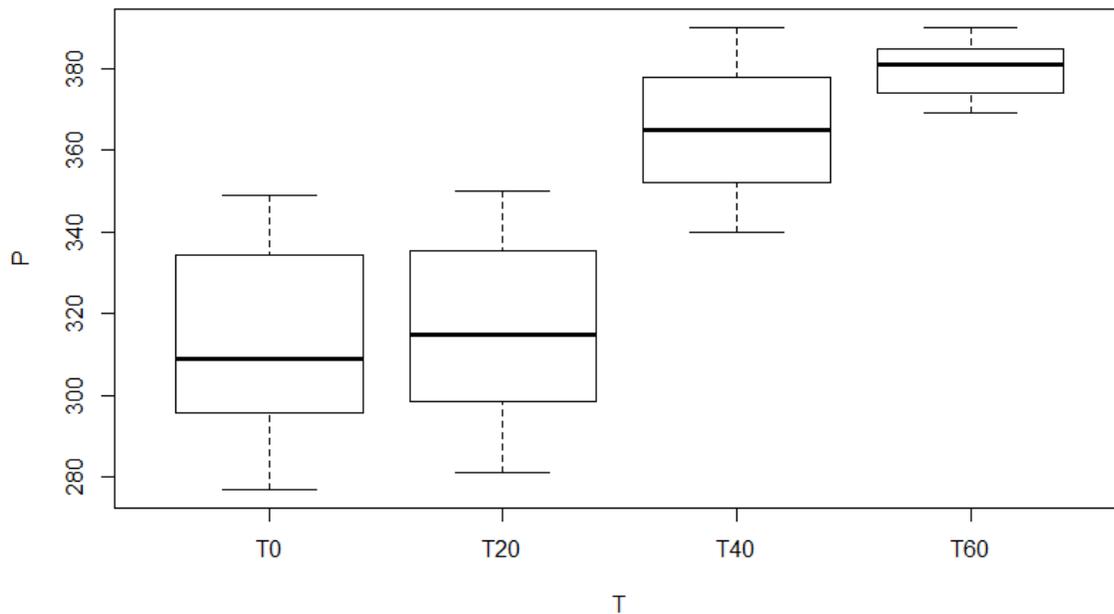
---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tukey multiple comparisons of means  
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = P ~ T)

\$T

	diff	lwr	upr	p adj
T20-T0	3.02500	-2.563277	8.613277	0.5027219
T40-T0	51.35000	45.761723	56.938277	0.0000000
T60-T0	66.43333	60.845056	72.021610	0.0000000
T40-T20	48.32500	42.736723	53.913277	0.0000000
T60-T20	63.40833	57.820056	68.996610	0.0000000
T60-T40	15.08333	9.495056	20.671610	0.0000000



**Figura G-1:** Boxplot para el peso promedio de lechuga por tratamiento para el ciclo 1

**Segundo ciclo**

```

      T
Length:480
Class :character
Mode  :character
      P
Min.   :224.0
1st Qu.:250.3
Median :271.9
Mean   :271.4
3rd Qu.:295.8
Max.   :310.8
    
```

Terms:

```

              T Residuals
Sum of Squares 261929.74 45015.16
Deg. of Freedom    3      476
    
```

Residual standard error: 9.724694  
 Estimated effects may be unbalanced

```

              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
T              3 374948 124983  887.5 <2e-16 ***
Residuals    476  67036    141
    
```

---

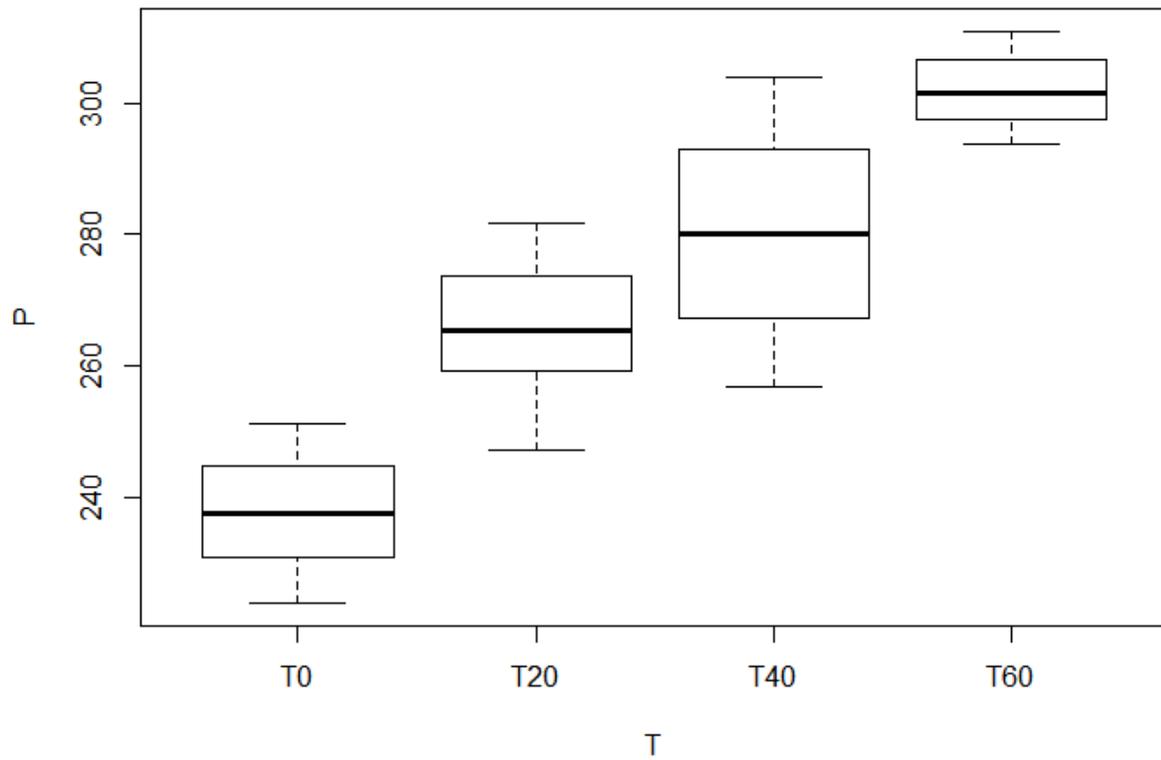
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tukey multiple comparisons of means  
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = P ~ T)

```

$T
      diff      lwr      upr      p adj
T20-T0  5.008333  1.05850  8.958167 0.0063413
T40-T0 53.216667 49.26683 57.166500 0.0000000
T60-T0 62.575000 58.62517 66.524834 0.0000000
T40-T20 48.208333 44.25850 52.158167 0.0000000
T60-T20 57.566667 53.61683 61.516500 0.0000000
T60-T40  9.358333  5.40850 13.308167 0.0000000
    
```



**Figura G-2:** Boxplot para el peso promedio de lechuga por tratamiento para el ciclo 2

## Bibliografía

Africano, K., Cely, G., y Serrano, P. 2016. Potencial de Captura de CO2 asociado al componente edáfico en páramos Guantiva-La Rusia, departamento de Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 21(1), 91-110. DOI: <https://doi.org/10.19053/01233769.4572>

Agronet (Red de información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano). Fecha de consulta: 3 de febrero de 2020. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>.

Cangi, R., Tarakcioglu, C. y Yasar, H. 2006. Effect of humic acid applications on yield, fruit characteristics and nutrient uptake in Ercis grape (*V. vinifera* L.) cultivar. *Asian J. Chem.*, 18 (2) (2006), pp. 1493-1499.

CCB (Cámara de comercio de Bogotá). 2015. Manual Lechuga. Núcleo Ambiental S.A.S. Programa de apoyo agrícola y agroindustrial- Vicepresidencia de fortalecimiento empresarial- Cámara de Comercio de Bogotá. Disponible en: [https://www.ccb.org.co › content › download › Lechuga](https://www.ccb.org.co/content/download/Lechuga)

Ciarkowska, K., Solek- Podwickaa, K., Filipek- Mazur, B. y Tabak, M. 2017. Comparative effects of lignite-derived humic acids and FYM on soil properties and vegetable yield. *Geoderma* 303 (2017) 85-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.022>.

Cortés, L. E., Bravo, I., Martín, F. J., y Menjivar, J. C. 2016. Extracción secuencial de metales pesados en dos suelos contaminados (Andisol y Vertisol) enmendados con ácidos húmicos. *Acta Agronomía* (2016) 65 (3) p 232-238. DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v65n3.44485>.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), 2012. Levantamiento detallado de suelos en las áreas planas de 14 municipios de la Sabana de Bogotá- Departamento de Cundinamarca- Escala 1:10.000.

Khaled, H. y Fawy, H. 2011. Effect of different level of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity. *Soil & Water Res.*, 6, 2011 (1): 21–29. DOI: <https://doi.org/10.17221/4/2010-SWR>

Kołodziej, B., Sugier, D y Bielińska, E. The effect of leonardite application and various plantation modalities on yielding and quality of roseroot (*Rhodiola rosea* L.) and soil enzymatic activity. *Journal of Geochemical Exploration* 129 (2013) 64-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.014>.

Meng, F., Yuan, G., Wei, J., Bi, D., Ok, S. Y., y Wang, H. 2017. Humic substances as a washing agent for Cd-contaminated soils. *Chemosphere* 181 (2017) 461-467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.127>.

MinSalud (Ministerio de Salud y Protección Social- República de Colombia). 2013. Resolución 004506 de 2013- Por la cual se establecen los niveles máximos de contaminantes en los alimentos destinados al consumo humano. Consultada: 5 de febrero de 2020. En: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-4506-de-2013.pdf>

Miranda, D., Carranza, C., Rojas, C. A., Jerez, C. M., Fischer, G., y Zurita, J. 2008. Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Revista Colombia de Ciencias Hortícolas- Vol. 2- No. 2- pp. 180-191*, 2008. DOI: <https://doi.org/10.17584/rcch.2008v2i2.1186>.

Montenegro, R. O. 2002. Contaminación química de suelos y cultivos. Estrategias para la productividad de los suelos agrícolas. *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Capítulo Cundinamarca, Bogotá*.

Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., y Vianello, A., 2002. Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 1527–1536. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8)

Olego, M.A, Cordero, J., Quiroga, M. J., Sánchez-García, M., Álvarez, J. C., y Garzón-Jimeno, E. 2015. Efecto de la incorporación de leonardita en el nivel de materia orgánica y micronutrientes en un suelo inceptisol dedicado a viña (*Vitis vinífera* L.). *ITEA* (2015), Vol. 111 (3), 2010- 226.

Ondrasek, G., Rengel, Z. y Romic D. 2018. Humic acids decrease uptake and distribution of trace metals, but not the growth of radish exposed to cadmium toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 151 (2018) 55-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.055>.

Ortiz, M. E., Zapata, R. D., y Sadeghian, S. 2006. Propiedades de la materia orgánica y capacidad complejante sobre el Aluminio en algunos suelos ándicos en Colombia. *Cenicafé* 57(1):51-57. Consultado: 08/08/2020. En: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/160/1/arc057%2801%29051-057.pdf>

Paul, E. A. 2016. The Nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biology & Biochemistry* 98 (2016) 109-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.001>

Schwarzenbach, R.P., Gschwend, P.M. e Imboden, D.M., 1993. *Environmental Organic Chemistry*. John Wiley & Sons Inc.

Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.

Sugier, D., Kolodziej, B. y Bielinska, E. 2013. The effect of leonardite application on *Arnica montana* L. yielding and chosen chemical properties and enzymatic activity of the soil. *Journal of Geochemical Exploration* 129 (2013): 76-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.013>.

Yu, Y., Wan, Y. N., Wang, Q., Li, H. F., 2017. Effect of humic acid-based amendments with foliar application of Zn and Se on Cd accumulation in tobacco. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 138, 286–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.01.011>.

Zhang, J. M., Xing, S. J., Sang, M. P., Ma, B. Y., Chu, X. M., Liu, C.S. Effect of humic acid on poplar physiology and biochemistry properties and growth under different water level. *J. Soil Water Conserv.*, 6 (2010), p. 042.