



SEP

SES

TecNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

“EVALUACIÓN DEL LODO GENERADO EN UN PROCESO DE POTABILIZACIÓN COMO SUSTRATO PARA LA PLANTA ORNAMENTAL *Hydrangea macrophylla* L. EN MACETA”

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

DIANA ELIZABETH SÓSTENES GARCÍA

No. CONTROL: 0228M0579

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS

CO-DIRECTORA DE TESIS:

DRA. MARITHZA GUADALUPE RAMÍREZ GERARDO



Instituto Tecnológico de Toluca

Metepec, Edo. de

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la

México.,
28/Agosto/2020
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN
DEPI-3200-363/2020

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada "EVALUACIÓN DEL LODO GENERADO EN UN PROCESO DE POTABILIZACIÓN COMO SUSTRATO PARA LA PLANTA ORNAMENTAL HYDRANGEA MACROPHYLLA L. EN MACETA", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental la C. DIANA ELIZABETH SÓSTENES GARCÍA con número de control 0228M0579 para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
DIRECTOR DE TESIS

DRA. MARIELA GUADALUPE RAMÍREZ GERARDO
CODIRECTORA DE TESIS

DR. JAIME MEJÍA CARRANZA
TUTOR DE TESIS

DR. GABRIEL VÁZQUEZ GONZÁLEZ
REVISOR DE TESIS





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Metepec, Edo. de México., 28/agosto /2020
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN
DEPI-3200-364/2020

C. DIANA ELIZABETH SÓSTENES GARCÍA
CANDIDATA AL GRADO MAESTRA EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA AMBIENTAL
P R E S E N T E

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica dependiente de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su trabajo de Tesis titulado **"EVALUACIÓN DEL LODO GENERADO EN UN PROCESO DE POTABILIZACIÓN COMO SUSTRATO PARA LA PLANTA HYDRANGEAMACROPHYLLA L. EN MACETA"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo

Sin más por el momento, quedo de usted.

A T E N T A M E N T E

"Educación, integridad y ciencia"

JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN



JLGR/IMAB



DEDICATORIAS

“La ciencia nunca resolverá un problema, sin crear otros 10 más”

George Bernard Shaw.

A mí Damián M. Sóstenes

Por haberme elegido para ser tu mamá en esta vida siendo ya 8 años de estar a tu lado, por tu cariño tan sincero, por las angustias y sonrisa que me brindas día a día haciendo que mi vida tenga un sentido basto y maravilloso ¡Te amo infinitamente hijo!

Luis, Maru, Lili, Dante, Rubi, Fati, Norma, Jeny, Javi y Leo

*Mi familia, que lo es todo, esa razón de ser feliz al saber que cuento con su apoyo infinito y que siempre me alientan en seguir adelante
¡Gracias!*

Erik Montes de Oca

Por alentarme desde el primer día en que te conocí y ayudarme a ver siempre el lado positivo de las cosas, sabes que este proyecto lleva una parte de tí, sin olvidar tu comprensión y paciencia que me brindas. ¡Te amo!

AGRADECIMIENTOS

Al TecNM/Instituto Tecnológico de Toluca, por abrirme sus puertas y permitirme continuar con la preparación profesional, por el apoyo brindado a través del Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental (LIIA).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada, para la realización de mis estudios de maestría.

Al Centro Universitario de Tenancingo (CUT) y Tecnológico de Estudios Superiores de Villa Guerrero (TESVG) por brindarme las instalaciones pertinentes para desarrollar el presente trabajo.

Al personal del laboratorio de suelos del área de Edafología del Colegio de Posgraduados (COLPOS) Montecillo, así también al personal del laboratorio de suelos del Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal (ICAMEX) por permitirme realizar una Estancia de Investigación como parte de mi formación académica.

A mis directores de tesis, Dr. José Luis García Rivas y Dra. Marithza Guadalupe Ramírez Gerardo, por su paciencia y comprensión, compartir sus conocimientos y mostrar disposición y compromiso para dirigir este trabajo de investigación. Al Dr. Gabriel Vásquez González, Dra. Beatriz García Gaitán, Dr. Jaime Mejía Carranza que conformaron mi comité revisor en diferentes etapas de evaluación, por sus aportaciones y observaciones realizadas, enriqueciendo el contenido de este trabajo.

Al apoyo y disposición brindada por parte de la División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI).

RESUMEN

La generación de lodos residuales, producto de la potabilización del agua superficial por coagulación-floculación y su mala disposición, es un problema de contaminación ambiental, debido a la elevada concentración de aluminio que éstos contienen y al impacto que representan a nivel de mantos freáticos. Los lodos de potabilización pueden ser empleados en la elaboración de sustratos para la producción de flores en maceta por lo cual el objetivo del proyecto fue evaluar el lodo generado en un proceso de potabilización para su aplicación como sustrato en la producción de hortensias en maceta. Para ello se consideraron cinco tratamientos en concentraciones: 0, 10, 20, 30 y 40 % de lodo mezclado con turba y perlita en un diseño de 6 bloques completamente aleatorizado, 5 tratamientos y 8 repeticiones, siendo la unidad experimental, una planta por maceta. La evaluación fisicoquímica bajo la NOM-021-SEMARNAT-2000 determinó que la muestra del lodo presentó un pH de 6.57, conductividad eléctrica de 1.449 dS m^{-1} , materia orgánica 8.32 %, nitrógeno total 0.65 %, fósforo disponible 0.26 mg kg^{-1} , potasio $0.68 \text{ cmol kg}^{-1}$, hierro total $21898.02 \text{ mg kg}^{-1}$ y aluminio total $126822.35 \text{ mg kg}^{-1}$; y para los sustratos (T0 al T4) acorde a las concentraciones, fluctuaron en intervalos de pH (6.69-7.03), conductividad eléctrica ($0.26\text{-}1.183 \text{ dS m}^{-1}$), materia orgánica (15.68-34.65 %), nitrógeno total (0.70-0.96 %), fósforo ($0.58\text{-}75.40 \text{ mg kg}^{-1}$) y potasio ($0.74\text{-}1.21 \text{ cmol kg}^{-1}$). Posteriormente, se desarrolló el estudio de la influencia del lodo en el cultivo de hortensias (*Hydrangea macrophylla L.*) en maceta. Durante 3 meses se tomaron datos de altura, diámetro, área foliar, cantidad de brotes (yemas) y número de macollos o hijuelos. El análisis estadístico de este estudio mostró que es factible el uso de lodo como sustrato a una concentración del 10 % sobre el crecimiento y desarrollo de la planta. Concentraciones superiores a 10 % disminuyeron el crecimiento de la planta; en el caso del tratamiento del 0 % no se vio reflejado el desarrollo y crecimiento debido a la alta cantidad de arena (87 %) que no permitió una buena retención de nutrientes y la pérdida de ellos en los riegos realizados. No se alcanzó completa la floración en todos los tratamientos en el tiempo establecido de la experimentación y probablemente a las concentraciones de Mn y Zn que

fueron muy altas $389.95 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mn y 9.62 mg kg^{-1} de Zn y a la baja concentración de Ca ($0.73\text{-}4.69 \text{ cmol kg}^{-1}$) y P ($0.77\text{-}3.66 \text{ mg kg}^{-1}$) en los tratamientos del 10 al 40 %. Con relación al contenido de aluminio, por las condiciones de acidez del suelo es muy baja la disponibilidad de este metal siendo una limitante para implementar el tratamiento fitocorrectivo; se espera que por efecto de la intemperización éste sea disponible para la planta y beneficie la coloración azul de las inflorescencias sin afectar su calidad comercial.

ABSTRACT

The generation of residual sludge, as a result of the purification of surface water by coagulation-flocculation and its poor disposal, is a problem of environmental contamination, due to the high concentration of aluminum that they contain and the impact they represent at the level of water tables. The purification sludge can be used in the preparation of substrates for the production of potted flowers, so the objective of the project was to evaluate the sludge generated in a purification process for its application as a substrate in the production of potted hydrangeas. For this, five treatments in concentrations were considered: 0, 10, 20, 30 and 40 % of mud mixed with peat and perlite in a completely randomized design of 6 blocks, 5 treatments and 8 repetitions, the experimental unit being one plant per pot. The physicochemical evaluation under NOM-021-SEMARNAT-2000 determined that the mud sample had a pH of 6.57, electrical conductivity of $1,449 \text{ dS m}^{-1}$, organic matter 8.32 %, total nitrogen 0.65 %, available phosphorus 0.26 mg kg^{-1} , potassium $0.68 \text{ cmol kg}^{-1}$, total iron $21898.02 \text{ mg kg}^{-1}$ and total aluminum $126822.35 \text{ mg kg}^{-1}$; and for the substrates (T0 to T4) according to the concentrations, they fluctuated in intervals of pH (6.69-7.03), electrical conductivity ($0.26\text{-}1.183 \text{ dS m}^{-1}$), organic matter (15.68-34.65 %), total nitrogen (0.70 -0.96 %), phosphorus ($0.58\text{-}75.40 \text{ mg kg}^{-1}$) and potassium ($0.74\text{-}1.21 \text{ cmol kg}^{-1}$). Subsequently, the study of the influence of mud on the cultivation of hydrangeas (*Hydrangea macrophylla* L.) in a pot was developed. For 3 months, data on height, diameter, leaf area, number of shoots (buds) and number of tillers or

suckers were taken. Statistical analysis of this study showed that it is feasible to use mud as a substrate at a concentration of 10 % on the growth and development of the plant. Concentrations higher than 10% decreased the growth of the plant; In the case of the 0% treatment, development and growth were not reflected due to the high amount of sand (87%) that did not allow a good retention of nutrients and the loss of them in the irrigation carried out. Flowering was not achieved in all treatments in the established time of experimentation and probably at very high concentrations of Mn and Zn 389.95 mg kg⁻¹ Mn and 9.62 mg kg⁻¹ Zn and at the low concentration of Ca (0.73-4.69 cmol kg⁻¹) and P (0.77-3.66 mg kg⁻¹) in treatments of 10 to 40 %. Regarding the aluminum content, due to the acidity conditions of the soil, the availability of this metal is very low, being a limitation to implement the phyto-corrective treatment; it is expected that due to weathering it will be available to the plant and will benefit the blue coloration of the inflorescences without affecting its commercial quality.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
INTRODUCCIÓN	xviii
1 FUNDAMENTOS.....	1
1.1 Proceso de potabilización del agua.....	1
1.1.1 Plantas Potabilizadoras	3
1.1.2 Generación de lodos provenientes de plantas potabilizadoras	8
1.1.3 Características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos	11
1.1.4 Estabilización de lodos	13
1.1.5 Disposición final del lodo de plantas potabilizadoras	15
1.2 Nutrición vegetal	22
1.2.1 Nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas	23
1.2.2 Funciones de los nutrientes en la planta.....	24
1.2.2.1 Macroelementos primarios.....	25
1.2.2.2 Macroelementos secundarios	26
1.2.2.3 Microelementos.....	27
1.2.2.4 Elementos esenciales beneficiosos	27
1.3 Fisiología vegetal	32
1.3 Fertilizantes.....	35
1.3.1 Fertilizantes químicos inorgánicos	36
1.3.1.1 Clasificación de los fertilizantes químicos inorgánicos.....	36
1.3.1.2 Composición de los fertilizantes químicos inorgánicos	37

1.3.1.3	Presentación de los fertilizantes químicos inorgánicos.....	39
1.3.2	Fertilizantes orgánicos o abonos orgánicos.....	39
1.3.2.1	Clasificación de los abonos orgánicos.....	39
1.3.2.2	Aprovechamiento de lodos enfocados al suelo.....	40
1.3.2.3	Aplicación de lodos como mejoradores de suelo.....	44
1.4	Sustratos.....	49
1.4.1	Tipos de sustratos.....	50
1.4.2	Características del sustrato ideal.....	51
1.4.3	Descripción general de los sustratos utilizados.....	52
1.5	Hortensia (<i>Hydrangea macrophylla</i> L.).....	54
1.5.1	Clasificación botánica de la hortensia.....	54
1.5.2	Condiciones edafoclimáticas.....	56
1.5.3	El cultivo en maceta.....	57
1.5.4	Nutrición y coloración de las flores.....	59
1.5.5	Control de plagas y enfermedades.....	61
1.5.6	Importancia y tendencia del cultivo de hortensia en maceta.....	64
2	MÉTODO.....	67
2.1	Lugar de experimentación.....	68
2.2	Diseño experimental.....	68
2.2.1	Elaboración de sustratos utilizando diferentes cantidades de lodo.....	69
2.3	Análisis estadístico.....	70
2.4	Obtención del lodo de la planta potabilizadora.....	71
2.4.1	Acondicionamiento del lodo.....	71
2.5	Obtención del material vegetal.....	72
2.6	Manejo agronómico.....	73

2.7 Variables determinadas	74
2.7.1 Planta.....	74
2.7.2 Caracterización del lodo y sustratos	77
2.7.2.1 Parámetros de fertilidad.....	78
2.7.2.2 Determinación de micronutrientes y metales contaminantes.....	82
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	83
3.1 Caracterización del lodo bajo la NOM-004-SEMARNAT.....	83
3.1 Parámetros de fertilidad del lodo.....	84
3.1.1 pH	84
3.1.2 Clase textural	87
3.1.3 Conductividad eléctrica.....	87
3.1.5 Materia orgánica	88
3.1.6 Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y densidad aparente	88
3.3 Análisis de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg).....	89
3.4 Análisis de micronutrientes (Cu, Fe, Mn y Zn) y metales contaminantes (Pb, Cd, Ni).....	91
3.4.1 Micronutrientes de Cu, Fe, Mn y Zn.....	91
3.4.2 Metales contaminantes Pb, Cd, Ni.....	93
3.5 Variables botánicas y fisiológicas.....	94
3.5.1 Altura de la planta	94
3.5.2 Diámetro del tallo de las plantas.....	96
3.5.3 Área foliar	98
3.5.4 Número yemas o brotes.....	100
3.5.4 Número de macollos o hijuelos.....	102
3.6 Contenido de clorofila	104

3.7 Descripción de síntomas visuales y color de las inflorescencias	107
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
6 FUENTES CONSULTADAS.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Procesos de potabilización de agua (CONAGUA, 2017).	1
Tabla 1. 2 Evolución de la potabilización en México y generación de lodos a lo largo de los años, desde 1993 hasta 2015 (CNA, 2015).	10
Tabla 1.3 Características de un lodo de sulfato de aluminio (CNA, 2007a).	12
Tabla 1.4 Concentración de metales de un lodo de potabilización usando como coagulante sulfato de aluminio (CNA, 2007a)	12
Tabla 1.5 Concentraciones de descargas típicas vs concentraciones de descarga del lodo de sulfato de aluminio (CNA, 2007 a).	16
Tabla 1.6 Elementos esenciales, formas de absorción y composición aproximada en las plantas (Ruíz, 2011).	31
Tabla 1.7 Caracterización de los fertilizantes químicos (Ruíz, 2011).	38
Tabla 1.8 Clasificación de los abonos orgánicos (Ramos y Terry, 2014).	40
Tabla 1.9 Comparación de las características fisicoquímicas del cultivo en suelo y maceta (Moran, 2004).	58
Tabla 2.10 Relación de la mezcla de sustratos.	70
Tabla 2.11 Relación del muestreo de hojas por planta para análisis de clorofila.	76
Tabla 3.12 Análisis de metales de los límites máximos permisibles del lodo con base a la NOM-004-SEMARNAT-2002.	84
Tabla 3.13 Resultados de los parámetros de fertilidad de la muestra de lodo y tratamientos.	85
Tabla 3.14 Resultados de fertilidad de los macronutrientes realizados a la muestra de lodo y tratamientos del 0 al 40%	90
Tabla 3.15 Resultados de fertilidad de los micronutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu) del lodo y tratamientos.	92
Tabla 3.16 Contenido de metales contaminantes (Pb, Cd, Ni) en muestras de lodo al 100% y tratamientos del 0 al 40%.	93
Tabla 3.17 Análisis de varianza (Anova) para la altura de la planta al 5 % de nivel de significancia.	94

Tabla 3.18 Comparación de medias (Tukey, 0.05) para altura de la planta de hortensia (<i>Hydrangea macrophylla</i>)	95
Tabla 3.19 Análisis de varianza (Anova) para el diámetro de la planta al 5 % de nivel de significancia	96
Tabla 3.20 Prueba de Tukey para el diámetro en el tallo de la planta de hortensia (<i>Hydrangea macrophylla</i>) en los bloques	97
Tabla 3.21 Análisis de varianza (Anova) para la altura de la planta al 5 % de nivel de significancia.....	98
Tabla 3.22 Comparación de medias (Tukey, 0.05) para el área foliar de la planta de hortensia (<i>Hydrangea macrophylla</i>)	99
Tabla 3.23 Análisis de varianza (Anova) para el número de brotes (yemas) de la planta al 5 % de nivel de significancia.....	100
Tabla 3.24 Prueba de Tukey para el número de brotes (yemas) en la planta en los bloques.....	101
Tabla 3.25 Análisis de varianza (Anova) para el número de macollos o hijuelos de la hortensia al 5 % de nivel de significancia	103
Tabla 3.26 Comparación de medias (Tukey, 0.05) para el número de macollos o hijuelos de la planta de hortensia (<i>Hydrangea macrophylla</i>).....	103
Tabla 3.27 Media y desviación estándar del contenido de clorofila en hojas de hortensia cultivadas en perlita, turba y lodo a diferentes concentraciones. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35%turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).	105

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Clarificación convencional (CONAGUA, 2017).....	4
Figura 1. 2 Filtración directa (CONAGUA, 2017).....	5
Figura 1. 3 Filtración lenta (CONAGUA, 2017).....	5
Figura 1. 4 Ablandamiento químico (CONAGUA, 2017).....	6
Figura 1. 5 Remoción de hierro y manganeso (CONAGUA, 2017).	6
Figura 1. 6 Adsorción con carbón activado (CONAGUA, 2017).	7
Figura 1. 7 Ósmosis inversa (CONAGUA, 2017).....	8
Figura1.8 Funciones de los macronutrientes en la planta	26
Figura 1. 9 Distribución del Al^{3+} en agua y las especies de $Al(OH)_n$ para 100 μM de aluminio total	30
Figura 1.10 Posible mecanismo de resistencia a la toxicidad del aluminio por medio de la exclusión de éste (Panniza, 2009).....	31
Figura 1.11 Mecanismos externos e internos para la nutrición de la planta	33
Figura 1.12 Estructura externa de la raíz	34
Figura 1.13 Estructura interna de la raíz.	35
Figura 1.14 Partes de la hortensia.....	55
Figura 1.15 Niveles tentativos de absorción de nutrientes para el cultivo de Hortensia (Mejía, 2015).....	60
Figura 1.16 Áfidos	62
Figura 1.17 Mildew polvoso u oidio en hoja de hortensia.....	63
Figura 2. 18 Esquema general de la metodología	67
Figura 2.19 Diseño experimental por bloques completamente aleatorizado de diferentes sustratos utilizando lodo (0, 10, 20,30, 40%) para el desarrollo de hortensia.....	69
Figura 2.20 Mezcla de los sustratos: perlita, turba y lodo.....	70
Figura 2.21 Obtención del lodo de manera manual en la planta potabilizadora (presa de lodos).....	71
Figura 2. 22 Extendido del lodo (a), secado (b1) (b2), molienda (c) y tamizado (d)	72

Figura 2.23 Plantas de hortensia obtenidas del vivero Regional No. 2 de Santa Ana Tenancingo, Estado de México	72
Figura 2.24 Invernaderos empleados para la experimentación	73
Figura 2.25 Desinfección de macetas (a), raíz de hortensia (b1, b2, b3) y corte de 10 cm de altura de las plantas (c)	73
Figura 2.26 Medición de altura de la planta de hortensia (<i>H. macrophylla</i>)	74
Figura 2.27 Diámetro del tallo de las plantas de hortensia	75
Figura 2.28 Medición de área foliar en las plantas de hortensia (<i>H. macrophylla</i>) durante la experimentación	75
Figura 2.29 Determinación de clorofila en plantas de hortensia en los diferentes tratamientos.....	77
Figura 2.30 Edificio de edafología y laboratorio de suelos del COLPOS.....	78
Figura 2.31 Determinación de densidad aparente del lodo de potabilización.....	79
Figura 2.32 Determinación de materia orgánica en el lodo al 100% y los tratamientos del 0 al 40%.....	79
Figura 2.33 Curva de calibración para la determinación de fósforo mediante el método de Bray y Kurtz 1	79
Figura 2.34 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico en el lodo de potabilización.....	80
Figura 2.35 Determinación de conductividad en el lodo y tratamientos.....	80
Figura 2.36 Espectrofotómetro de absorción atómica y lámpara de cátodo hueco para la determinación de cationes solubles en el lodo de potabilización.	81
Figura 2.37 Determinación de nitrógeno total en el lodo al 100% y tratamientos del 0 al 40%	81
Figura 2.38 Determinación de textura mediante el método de la pipeta en el lodo al 100% y tratamientos del 0 al 40%.....	82
Figura 2.39 Determinación de metales totales en el lodo de potabilización	82
Figura 3.40 Comparación con medias (Tukey, 0.05) para altura de la planta de hortensia (<i>Hydrangea macrophylla</i>) con las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20%	

lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35%turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).	96
Figura 3.41 Comparación con medias (Tukey, 0.05) para diámetro (mm) de la planta de hortensia (<i>Hydrangea macrophylla</i>) con las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35%turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).	98
Figura 3.42 Comparación con medias (Tukey, 0.05) para área foliar de la planta (cm) de la planta de hortensia (<i>Hydrangea macrophylla</i>) con las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35%turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).	100
Figura 3.43 Comparación con medias (Tukey, 0.05) para número de brotes (yemas) de la planta de hortensia (<i>Hydrangea macrophylla</i>) con las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35%turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).	102
Figura 3.44 Comparación con medias (Tukey, 0.05) para número de macollos o hijuelos de la planta de hortensia (<i>Hydrangea macrophylla</i>) con las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35%turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).	104
Figura 3.45 Comparación visual del T0 y T4 en el contenido de clorofila.....	106
Figura 3.46 Número y tipo de Inflorescencias de acuerdo a las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35%turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).	109
Figura 3.47 Diferentes Inflorescencias de acuerdo a las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35%turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).	111

INTRODUCCIÓN

En México la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, define los lodos como sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización (SEMARNAT, 2002). Los lodos de las plantas potabilizadoras suelen contener arcilla, arena, y material orgánico (Aldana y Pérez, 2017) que pueden ser utilizados en la práctica agrícola como mejoradores de suelo con nutrimentos minerales de interés y otros cuya presencia es indeseable por su posibilidad de contaminación (Bautista *et al.*, 2015).

La cantidad de lodos generados dependerá de las características de la fuente de agua superficial (Espejel, 2007). El manejo inadecuado de los lodos de potabilización constituye una fuente de problemas ambientales, como la contaminación de suelos, contaminación de aguas subterráneas, la emisión de gases perjudiciales, humos y malos olores (Esteller, 2002), además los lodos pueden contener patógenos y subproductos formados en la etapa de coagulación-floculación como hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$ por el uso de coagulantes, generalmente sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). La posibilidad de contaminar suelos y aguas subterráneas constituye la principal limitante para su uso agrícola, de ahí que su utilización deba estar adecuadamente planeada y supervisada. Los efectos positivos que proporciona la incorporación de los lodos de potabilización a los suelos es la elevación de la capacidad de intercambio catiónico, mayor estabilidad de agregados, nivel de fertilidad, contenido de materia orgánica y mejora la retención hídrica (Díaz, 2010).

Los lodos se han utilizado como material de cobertura, relleno o adecuación de zonas verdes (cementeros, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos), producto térreo para uso en áreas privadas (jardines, antejardines, patios y arborización), como abono en plantaciones forestales, procesos de agricultura; aplicado al suelo con algunas restricciones debido a que pueden presentar una alta carga patogénica y presencia de elementos traza metálicos (Paz *et al.*, 2007),

acondicionador de suelos en la recuperación restauración o mejoramiento de suelos degradados, insumo en la elaboración de fertilizantes orgánicos (abonos) o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original e insumo en la fabricación de materiales de construcción (Aldana y Pérez, 2017). Otra alternativa viable es su valorización cuando presentan una elevada concentración de aluminio, empleándolos en procesos de bioremediación en plantas excluseras de este metal, como trigo (*Triticum aestivum* L.), centeno (*Secale cereale* (L) M. Bieb), avena (*Avena sativa* L.), soja (*Glycine max* (L.) Merr.) y rábano (*Raphanus sativus* L.) las cuales acumulan el aluminio en el suelo de la rizosfera (Ruíz, 2011). Con base en los resultados obtenidos en los estudios anteriormente citados, el uso de los lodos de potabilización se podría ampliar a especies ornamentales y en particular ornamentales de maceta.

En México, se reportan 874 plantas potabilizadoras que producen alrededor de 2487 m³ h⁻¹ del total del agua tratada 3.08 x 10⁹ m³ h⁻¹ (CONAGUA, 2015). Una planta potabilizadora ubicada en el Estado de México, procesa alrededor 54000 m³ h⁻¹ y genera 378 m³ h⁻¹ de lodos, los cuales pudieran utilizarse como aditivos del suelo. Sin embargo, antes de aplicar los lodos, debe probarse su efecto en las plantas, bajo la hipótesis de que el lodo generado de un proceso de potabilización es un buen mejorador orgánico del suelo para el adecuado desarrollo de la planta ornamental *Hydrangea macrophylla* L. en maceta. Por lo anterior el objetivo general del presente trabajo fue, evaluar el lodo generado de un proceso de potabilización para utilización como sustrato en la planta ornamental en estudio y los objetivos específicos planteados fueron: caracterizar el lodo y la mezcla del sustrato con lodo en contenido de materia orgánica, textura, conductividad eléctrica, aluminio, pH, macronutrientes y micronutrientes; así como evaluar el efecto del uso del lodo en el crecimiento y desarrollo de la planta con sustrato y sustrato más lodo.

1 FUNDAMENTOS

1.1 Proceso de potabilización del agua

El objetivo de un sistema de potabilización es producir, a partir de una fuente de suministro dada, agua con calidad acorde a la norma mexicana NOM-127- SSA1-1994 en forma confiable y a un costo razonable. Para lograrlo, se combinan una serie de procesos y operaciones unitarias que remuevan los compuestos contaminantes que estén presentes en la fuente de suministro. Un sistema adecuado depende de la calidad original del agua, la suficiencia financiera del organismo operador, el nivel de capacitación de los operadores y la tratabilidad del agua (CNA, 2007b). En la tabla 1.1 se resumen las acciones y procesos de purificación de agua más utilizados.

Tabla 1.1 Procesos de potabilización de agua (CONAGUA, 2017).

Proceso	Propósito
Tratamiento preliminar	
Cribado	Remoción de sólidos grandes que pueden obstruir o dañar los equipos de la planta
Pretratamiento químico	Remoción eventual de algas y otros elementos acuáticos que causan sabor, olor y color
Presedimentación	Remoción de arena, limo y otros materiales sedimentables
Aforo	Medición del agua de abastecimiento por tratar

Tratamiento principal	
Aireación	Remoción de olores y gases disueltos; adición de oxígeno para mejorar sabor y oxidación de diversos elementos
Coagulación/floculación	Conversión de sólidos no sedimentables en sólidos sedimentables
Sedimentación	Remoción de sólidos sedimentables
Ablandamiento	Remoción de dureza
Filtración	Remoción de sólidos finos, flóculos en suspensión y la mayoría de los microorganismos
Adsorción	Remoción de sustancias orgánicas y color
Desinfección	Eliminación de organismos patógenos

CONAGUA, anteriormente CNA (2007b), menciona que, en cuanto a calidad, el objetivo de la potabilización es producir agua:

- Segura, sin compuestos químicos y/u organismos patógenos que pongan en riesgo la salud de los consumidores.
- Aceptable, que no tenga un sabor o color desagradable.
- Clara, libre de materia suspendida y turbiedad.
- Razonablemente blanda, es decir, que los usuarios no requieran grandes cantidades de detergentes y jabones para la ducha, lavar ropa y trastes.
- No corrosiva al sistema de distribución.
- Con bajo contenido orgánico, para evitar crecimiento biológico en el sistema de distribución y afectar la calidad del agua

Por otro lado el Comité Mixto de Expertos de la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO) / Organización Mundial de la Salud (OMS) en Aditivos Alimentarios (JECFA) establecen un valor de 0.9 mg L^{-1} de aluminio de acuerdo con la ingesta semanal tolerable provisional (ISTP), pero

consideran las preocupaciones de salud que genera el aluminio (es decir, su potencial neurotóxico) por lo que establecen un nivel de 0.1 a 0.2 mg L⁻¹ en el agua potable basado en la optimización de los procesos de coagulación en plantas de agua de consumo humano que utilizan coagulantes a base de aluminio (OMS, 2018).

1.1.1 Plantas Potabilizadoras

Existe una gran variedad de sistemas de tratamiento y diversas combinaciones de operaciones unitarias para lograr una calidad de agua determinada en función de la calidad de agua de la fuente (Conagua, 2017).

Conagua (2012), en el “Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales de diciembre 2012” los principales tipos de plantas potabilizadoras en México son:

1. Clarificación convencional
2. Clarificación de patente
3. Filtración directa
4. Filtración lenta
5. Ablandamiento
6. Remoción de hierro-manganeso
7. Adsorción con carbón activado
8. Ósmosis inversa

1. Plantas de clarificación completa o convencional (figura 1.1). Son aquellas que coagulan y filtran agua superficial con valores altos de turbiedad, color, microorganismos, cantidades menores de algas, y algunos compuestos orgánicos. Generalmente usan sales de aluminio o de hierro para la coagulación,

y como ayuda del proceso utilizan algún tipo de polímero (CNA, 2007a). En el país se tiene un registro de 215 plantas clarificadoras en operación, con un caudal potabilizado de $69.527 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CNA, 2015).

2. Platas de clarificación de patente. Pueden ser de cualquier proceso (por ejemplo, clarificación convencional, filtración directa, filtros lentos), la cual haya sido modificada en alguna de sus partes y se considera de fabricación exclusiva por el fabricante (Conagua, 2017). Existen 154 plantas de patente en el país con un caudal de $5.058 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CNA, 2015).

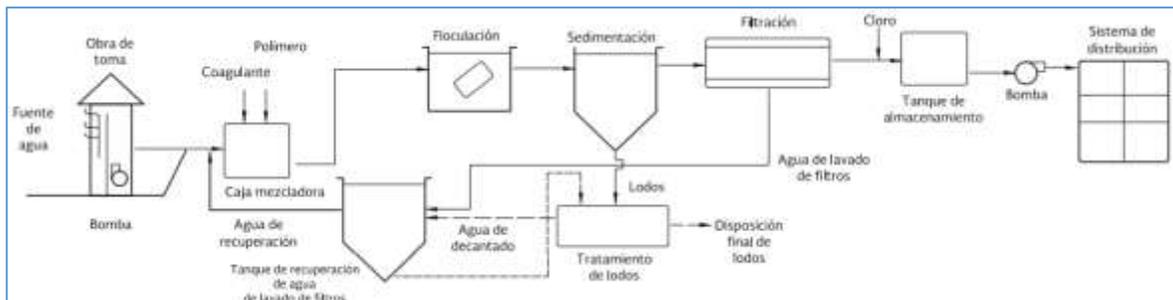


Figura 1.1 Clarificación convencional (CONAGUA, 2017).

3. Plantas de filtración directa (figura 1.2). Proceso de clarificación para potabilizar aguas superficiales o subterráneas con niveles bajos de turbiedad, color y/o microorganismos. El tren de tratamiento se integra generalmente por mezcla rápida de reactivos químicos, filtración y desinfección. En condiciones especiales se prescinde de la adición de reactivos químicos, no va precedida de un sedimentador (Conagua, 2017). Se tiene un registro de 101 plantas de filtración directa en operación, con un caudal potabilizado de $16.223 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CNA, 2015).

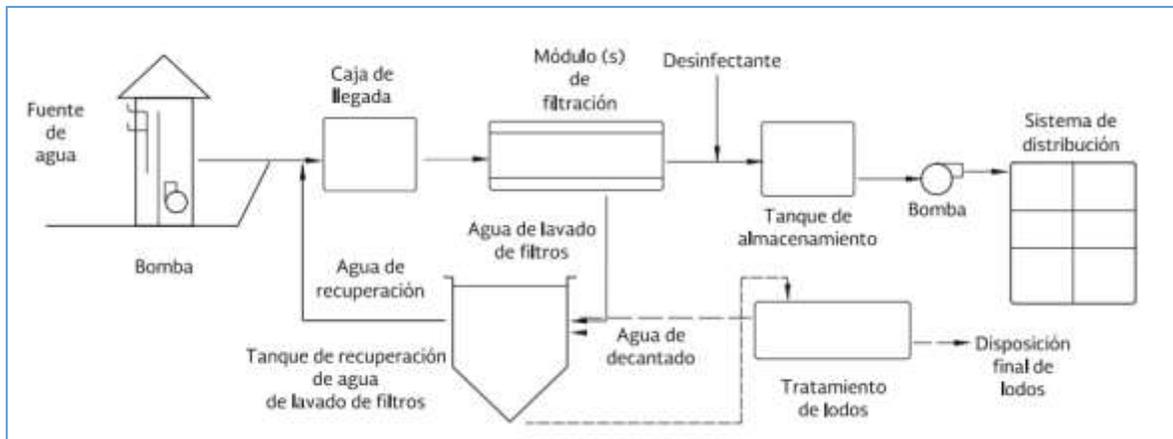


Figura 1. 2 Filtración directa (CONAGUA, 2017).

4. Filtración lenta (figura 1.3). Permite una buena eliminación de bacterias, color, turbiedad, así como ciertos problemas de olor y sabor en el agua generalmente para pequeños sistemas de abastecimiento. El tren se integra con filtración y desinfección, en donde el medio filtrante graduado no trabaja estratificado y su limpieza es manual, extrayendo la capa más superficial del filtro con la materia retenida (Conagua, 2017). Se tiene un registro de 10 plantas de filtración lenta en operación, con un caudal potabilizado de $0.0556 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CNA, 2015).

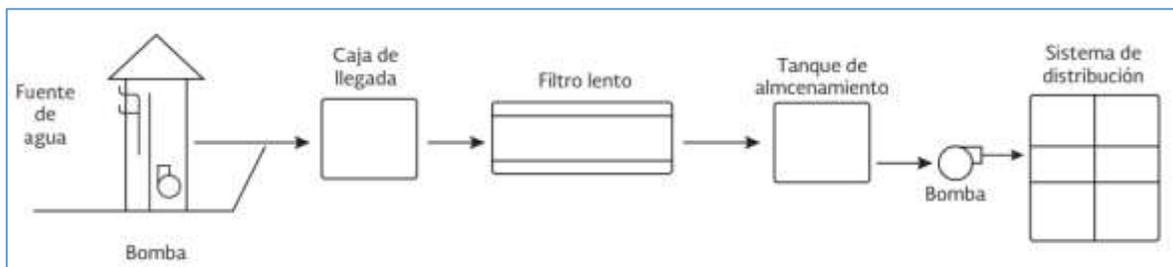


Figura 1. 3 Filtración lenta (CONAGUA, 2017).

5. Plantas de ablandamiento químico (figura 1.4). Proceso para reducir la dureza del agua debido a la presencia de iones de calcio y magnesio. Normalmente es por precipitación química, pero también puede intercambio iónico u otros procesos específicos, consta de una adición de cal-carbonato de sodio mezcla

rápida, floculación, sedimentación, adición de CO_2 , filtración y desinfección (CNA, 2007a). Hay 18 plantas de ablandamiento en el país, con un caudal potabilizado de $0.469 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CNA, 2015).

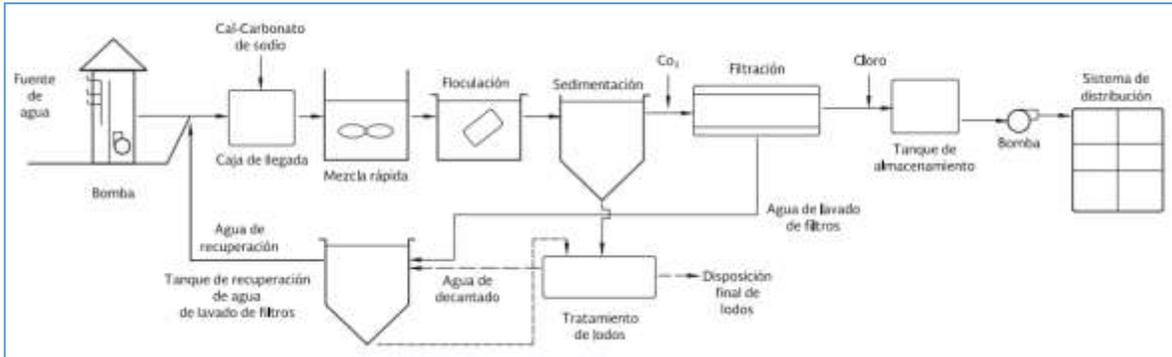


Figura 1. 4 Ablandamiento químico (CONAGUA, 2017).

6. Plantas de remoción de hierro y manganeso (figura 1.5). Estas plantas utilizan aeración y/o algún agente oxidante fuerte como el permanganato de sodio o el cloro para formar material floculado (flócs pequeños y débiles) de hierro y manganeso como hidróxido férrico y dióxido de manganeso para posteriormente ser removidos por filtros gruesos ascendentes en capas (CNA, 2007a). Se tienen registradas 21 plantas de remoción de hierro y manganeso en el país, con un caudal potabilizado de $4.388 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CNA, 2015).

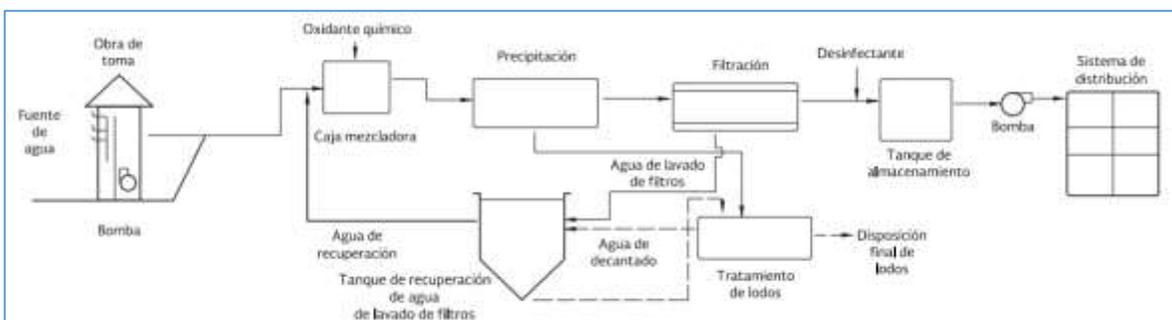


Figura 1. 5 Remoción de hierro y manganeso (CONAGUA, 2017).

7. Plantas de adsorción con carbón activado (figura 1.6). Este tipo de plantas eliminan sabor y olor del agua, previenen daños a las membranas de ósmosis inversa y a las resinas de intercambio iónico y diferentes tipos de carbón activado eliminan diferentes tipos de contaminantes como compuestos orgánicos, incluyendo solventes, pesticidas, desechos industriales entre otros, algunos metales pesados como plomo, radón (CNA, 2007a). Después del pretratamiento y filtración se realiza la adsorción con carbón activado. Son un total de 35 plantas potabilizadoras de adsorción con carbón activado que se tienen registradas en el país con un caudal de $0.026 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CNA, 2015).

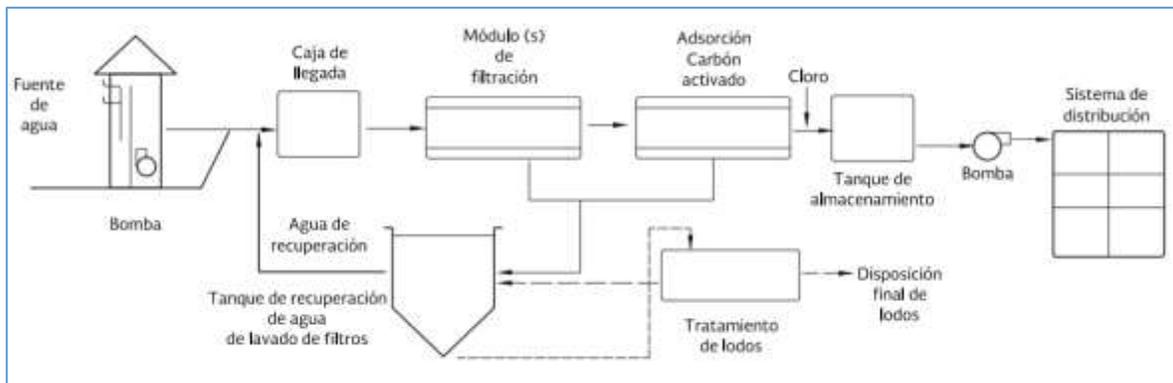


Figura 1. 6 Adsorción con carbón activado (CONAGUA, 2017).

8. Plantas de ósmosis inversa (figura 1.7). Permite eliminar un elevado porcentaje de impurezas, bacterias y microorganismos presentes en el agua. El sistema de filtros y membrana consigue eliminar los niveles de metales pesados y sales minerales, principalmente el plomo, sodio, nitratos, entre otros. Así mismo filtra las partículas disueltas en el agua y mejora la composición causante de olores y sabores. Consta generalmente de un pretratamiento y posteriormente una unidad de ósmosis inversa (CNA, 2007a). Se tiene un registro de 301 plantas de ósmosis inversa en operación, con un caudal potabilizado de $1.866 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CNA, 2015).

remover mediante los métodos mecánicos normales. La especie resultante de hidróxido de aluminio tiene un peso molecular de 132 y 1 mg L⁻¹ de sulfato de aluminio agregado al agua producirá aproximadamente 0.44 mg L⁻¹ de sólidos inorgánicos de aluminio. Los sólidos suspendidos presentes en el agua cruda producen un peso equivalente de sólidos en el lodo, ya que no reaccionan. Se puede suponer que otros aditivos, tales como los polímeros o el carbón activado en polvo, producen lodo en la misma cantidad añadida. La cantidad de lodo producido en una planta de coagulación con sulfato de aluminio para la remoción de turbiedad es (CNA, 2007a):

$$S = 86.4 Q(0.44 Al + SS + A) \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

S: lodo producido, (kg día⁻¹)

Q: gasto, (m³ s⁻¹)

Al: dosis de sulfato de aluminio como Al₂O₃ al 17.1, (mg L⁻¹)

SS: sólidos suspendidos del agua cruda, (mg L⁻¹)

A: productos químicos adicionales agregados tales como polímero, arcilla, carbón activado, (mg L⁻¹)

En México, existen aproximadamente 874 plantas potabilizadoras (CNA, 2015), que en conjunto tratan alrededor de 97.9 m³ s⁻¹ de agua, (tabla 1.2), las cuales, 215 plantas utilizan algún tipo de coagulante para eliminar los sólidos suspendidos que contiene el agua, donde el sulfato de aluminio es el más utilizado. Considerando un valor medio de producción de lodos del 0.7 % del agua tratada; en el país se generan alrededor de 0.69 m³ s⁻¹ o 59 616 m³ d⁻¹ de lodos, que deben ser manejados y dispuestos adecuadamente (Sandoval *et al.*, 2017)

Tabla 1. 2 Evolución de la potabilización en México y generación de lodos a lo largo de los años, desde 1993 hasta 2015 (CNA, 2015).

Evolución de la potabilización en México			
Año	No. de Plantas	Q operación (L s⁻¹)	Lodos generados (Son el 0.7% del agua tratada en L s⁻¹)
1993	S/D	69,938.50	489.57
1994	S/D	74,028.50	518.20
1995	S/D	76,617.50	536.32
1996	S/D	72,337.50	506.36
1997	S/D	74,422.50	520.96
1998	295	76,842.00	537.89
1999	324	78,157.00	547.10
2000	336	78,319.00	548.23
2001	400	84,878.90	594.15
2002	439	81,796.60	572.58
2003	465	83,660.20	585.62
2004	482	85,605.80	599.24
2005	488	87,052.32	609.37
2006	491	85,398.99	597.79
2007	541	86,393.15	604.75
2008	604	87,310.00	611.17
2009	631	90,040.30	630.28
2010	645	91,722.80	642.06
2011	653	94,647.20	662.53
2012	699	96,446.40	675.12
2013	742	94,791.70	663.54
2014	779	96,274.80	673.92
2015	874	97,895.60	685.27

S/D: Sin Dato.

1.1.3 Características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos

Torres (2009), menciona que las características fisicoquímicas de un lodo definen las necesidades de tratamiento, las condiciones para su disposición final y su posible utilización, siendo de mayor interés el uso agronómico por las condiciones que presentan. Las características físicas que se le pueden determinar a un lodo son aquellas que pueden detectarse sensorialmente, como color, olor, temperatura, porcentaje de humedad, contenido de sólidos entre otros, para conocer la condición del lodo, algunos de estos parámetros pueden cuantificarse analíticamente con pruebas de laboratorio. Las características químicas son aquellas que debido a elementos o compuestos químicos orgánicos e inorgánicos pueden provocar efectos nocivos al contacto humano y se determinan de acuerdo al tipo de disposición final o reúso que se le quiera dar a los lodos, entre estas características se pueden determinar pH, materia orgánica medida como DBO (demanda bioquímica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), y carbono orgánico total (COT), contenido de metales pesados y no pesados, además de nutrientes como nitrógeno y fósforo (Espejel, 2007).

Los parámetros microbiológicos que se encuentran regulados para el aprovechamiento de lodos y biosólidos son básicamente coliformes fecales, Salmonella y huevos de helmintos. La NOM-004-SEMARNAT-2002 define estos parámetros y establece los límites máximos permisibles y las técnicas analíticas para la cuantificación de patógenos, parásitos en lodos y biosólidos (Espejel, 2007). En la tabla 1.3 se presentan los rangos de la caracterización fisicoquímica de un lodo de potabilizadora donde se emplea sulfato de aluminio y en la tabla 1.4 los valores de concentración de metales para el mismo tipo de lodo.

Tabla 1.3 Características de un lodo de sulfato de aluminio (CNA, 2007a).

Parámetro	Valor	Unidad
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO ₅	30 a 300	mg L ⁻¹
Demanda química de oxígeno, DQO	30 a 5,000	mg L ⁻¹
pH, unidades	6 a 8	
Sólidos totales	0.1 a 4	%
Óxido de aluminio	15 a 40	%
Sílice e inertes	35 a 70	%
Materia orgánica	15 a 25	%
Aluminio disuelto	0.024 a 0.450	mg L ⁻¹
Aluminio total	808.3 a 2,567	mg L ⁻¹
Manganeso disuelto	1.66 a 7.28	mg L ⁻¹
Manganeso total	46.5 a 73.9	mg L ⁻¹
Fierro total	100 a 222	mg L ⁻¹
Fierro disuelto	3.5 a 6.47	mg L ⁻¹
Carbón orgánico total	22.9 a 245	mg L ⁻¹
Giardia	52.84 a 67.1	quiste L ⁻¹
Cryptosporidium	26.42 a 38.4	quiste L ⁻¹

Tabla 1.4 Concentración de metales de un lodo de potabilización usando como coagulante sulfato de aluminio (CNA, 2007a)

Metal	mg L⁻¹	mg kg⁻¹, base seca
Aluminio	850	170000
Bario	<1.0	
Cadmio	<0.01	
Cobalto	0.08	16
Cobre	0.45	90
Cromo	0.35	70
Hierro	33	62400

Magnesio	12	2360
Manganeso	0.34	68
Plata	<0.01	
Plomo	0.50	100
Zinc	0.11	22

1.1.4 Estabilización de lodos

Son los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten los lodos para acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final y evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente (SEMARNAT, 2002). Este proceso tiene las ventajas de reducir la masa y volumen de éstos, ayuda a minimizar la generación de olor, destruir patógenos y reducir los materiales para la atracción de vectores (roedores, moscas, mosquitos, entre otros) (Torres, 2009), y al final se obtiene un producto denominado “biosólido”. Estos biosólidos poseen características físicas, químicas y microbiológicas que deben ser evaluadas para determinar una adecuada disposición (Torres, 2017).

Los cuatro métodos más comunes para estabilizar los lodos son:

- Digestión anaerobia
 - Digestión aerobia
 - Composteo
 - Adición de cal
-
- **Digestión anaerobia:** En este proceso se propicia la degradación de la materia orgánica contenida en ausencia de oxígeno molecular transformándola en gas metano, bióxido de carbono y agua por los microorganismos (Torres, 2009). El proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado, los lodos se

introducen en el reactor de forma continua o intermitente y permanecen dentro de estos tanques durante periodos de tiempo considerables. El lodo estabilizado que se extrae del proceso tiene un bajo contenido de materia orgánica y de microorganismos patógenos vivos NOM-004 (SEMARNAT, 2002).

- **Digestión aerobia:** Es la transformación bioquímica de la materia orgánica presente en los lodos, que es transformada en bióxido de carbono y agua por los microorganismos en presencia de oxígeno NOM-004 (SEMARNAT, 2002). Conforme se agota el suministro de alimento, los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma para obtener la energía necesaria para las relaciones de mantenimiento celular.
- **Composteo:** El proceso de compostaje es el proceso más frecuente utilizado para la transformación orgánica de los residuos sólidos urbanos a un material húmico estable. Este proceso se efectúa mediante la fermentación, controlando factores que influyen durante el tratamiento (temperatura, pH, humedad y aireación) de la fracción orgánica de los residuos por poblaciones de microorganismos aerobios. (bacterias, hongos y actinomicetos). La riqueza en la materia orgánica, permite mejorar las propiedades del suelo, incrementar su porosidad mejorando la aireación, aumentando la retención y absorción de humedades impidiendo la colocación de los nutrientes. Según esto el compostaje es un regenerador, acondicionador o corrector de suelos (Torres, 2017).
- **Estabilización alcalina:** Es el proceso mediante el cual se añade suficiente cal viva (óxido de calcio CaO) o cal hidratada (hidróxido de calcio Ca(OH)_2) o equivalentes, a la masa de lodos y biosólidos para elevar el pH NOM-004 (SEMARNAT, 2002). Con el incremento de pH se pretende tener condiciones desfavorables para el crecimiento de patógenos. Los biosólidos generados con esta estabilización tiene menor cantidad de nitrógeno que otros debido a que el nitrógeno es convertido en amoníaco durante el proceso (Torres, 2009).

1.1.5 Disposición final del lodo de plantas potabilizadoras

Estos desechos varían mucho en cuanto a su composición, contienen lo que remueven como los reactivos que se añaden y otros componentes originalmente presentes en el agua (CNA, 2007b). La elección del tipo de método de disposición dependerá de las características de los lodos, legislación aplicable y los costos (Espejel, 2007). De acuerdo a su naturaleza, los lodos deben ser tratados antes de disponerse para reducir la atracción de vectores, los olores y los riesgos a la salud (Limón, 2019).

Algunas opciones disponibles para la disposición final de los lodos son las siguientes:

1. Descarga a cuerpos receptores
2. Descarga al sistema de alcantarillado
3. Disposición en un relleno sanitario
4. Disposición en el terreno
5. Recuperación de subproductos

1. Descarga directa a cuerpos receptores

Esta es la forma de disposición más usada en México. La descarga incluye tanto las purgas de los clarificadores, como la corriente de agua de lavado de filtros. En las plantas construidas recientemente esta descarga ha disminuido significativamente, al recircularse el agua de lavado de filtros al afluente de la planta, la razón de esta recirculación ha sido la recuperación del agua, no el control de la contaminación del cuerpo receptor. Para poder realizar una descarga a un cuerpo receptor se requiere un permiso de descarga de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), este permiso incluye las condiciones particulares de descarga, que se determinan en base a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, como son los usos del cuerpo

receptor, las características de gasto y calidad del agua del cuerpo receptor; de tal forma que las características de calidad del cuerpo receptor con la incorporación de la descarga no sobrepasen los Criterios Ecológicos para el uso del agua en el cuerpo receptor (CNA, 2007a).

En la tabla 1.5 se presentan ejemplos del uso del cuerpo receptor y las concentraciones de descargas típicas comparadas con las concentraciones de lodos de plantas potabilizadoras donde se emplean sulfato de aluminio, de acuerdo a los valores que se observan en la tabla, la descarga de lodos a cuerpos receptores no puede realizarse sin tratamiento previo.

Tabla 1.5 Concentraciones de descargas típicas vs concentraciones de descarga del lodo de sulfato de aluminio (CNA, 2007 a).

USO DEL CUERPO RECEPTOR (Corriente superficial)	CONCENTRACIÓN MÁXIMA			
	Condiciones particulares de descargas típicas			
	Aluminio (mg L⁻¹)	Hierro (mg L⁻¹)	Manganeso (mg L⁻¹)	SST (mg L⁻¹)
Fuente de abastecimiento de agua potable	2	3	0.5	100
Riego agrícola	10	50	2	100
Protección de la vida acuática	2	3	0.5	100
Concentraciones típicas de los lodos químicos				
Lodo de sulfato de aluminio	645 a 808	222 a 2567	46.5 a 73.9	1000 a 40 000
Agua de retrolavado de sulfato de aluminio	30 a 80	10 a 25		100 a 500

SST: Sólidos suspendidos totales

2. Descarga al sistema de alcantarillado

Este método de disposición se utiliza en México cuando la planta potabilizadora se encuentra dentro del área urbana. Sin embargo, el gasto de los lodos debe igualarse para no sobrecargar las atarjeas del alcantarillado, además de que las purgas de los clarificadores pueden ser muy espesas. La norma NOM-CCA-031-ECOL/1993, aun cuando no se refiere a los residuos de las plantas potabilizadoras, sirve de indicador de la calidad que se puede descargar a un sistema de alcantarillado (Espejel, 2007).

La CNA, (2007b) menciona algunos efectos de la descarga de residuos de plantas potabilizadoras en los procesos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, como son:

- toxicidad a los procesos biológicos
- remoción o incremento de los sólidos suspendidos
- remoción o incremento de la materia orgánica
- remoción de fósforo

Dicha toxicidad se presenta principalmente por el contenido de metales pesados en los residuos de las plantas potabilizadoras. La adición de los sólidos suspendidos de los residuos de plantas potabilizadoras tiene el efecto de aumentar el contenido de sólidos suspendidos y turbiedad en el efluente del sedimentador primario (CNA, 2007b).

La adición de los sólidos tiene el efecto de disminuir la DBO del efluente debido a la adsorción de materia orgánica en el flóculo de sulfato de aluminio que sedimenta en el tanque de sedimentación. Los lodos de hidróxido de aluminio reducen aun cuando no de manera significativa, la concentración de fósforo en el efluente del sedimentador primario. Los sólidos de plantas de ablandamiento elevan la concentración de sólidos en el efluente, sin embargo, no reducen el contenido de fósforo. Se tienen efectos negativos por la adición de los residuos de las plantas

potabilizadoras en el caso de plantas de tratamiento biológico sin sedimentación primaria, ya que los sólidos impactan directamente sobre el tratamiento biológico. El mayor efecto de la descarga de residuos en el drenaje los resiente el sistema de manejo de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales por el incremento en la masa y volumen de lodos correspondiente a los lodos de la planta potabilizadora. Es decir, el problema del manejo se transfiere a la planta de tratamiento de aguas residuales (CNA, 2007a).

3. Disposición en un relleno sanitario

La disposición final en un relleno sanitario consiste en depositar los residuos en sitios debidamente controlados y operados, ubicados en áreas alejadas de lagos, estanques, ríos, pozos para suministro de agua, carreteras, aeropuertos y zonas habitadas, compactándolos y cubriéndolos con tierra. En este caso, es importante que los lodos estén bien deshidratados para evitar que propicien la formación de lixiviados, comúnmente se requiere un contenido de 15 a 30 % de sólidos del lodo. Para los lodos de sulfato de aluminio, el requerimiento de concentración de sólidos es de por lo menos el 25% en concentraciones más bajas, la aplicación en suelo es más apropiada (Espejel, 2007).

Para la aceptación de los lodos de potabilizadora en un relleno sanitario municipal de residuos sólidos, deberá demostrarse que dichos lodos no son peligrosos, mediante la aplicación de la norma NOM-CRP-001-ECOL/93. Esta regulación está ligada con la producción de lixiviados y es prácticamente el único que actualmente se exige en México para admitir un residuo en un relleno sanitario municipal (CNA, 2007b).

En un relleno específico para lodos de la planta potabilizadora, los dos principales métodos de disposición en rellenos sanitarios son rellenos por trincheras o por área. El relleno por trincheras se puede subdividir en trincheras angostas o anchas.

El relleno por área se divide en tres diferentes tipos: por montículos, por capas o por diques. El método seleccionado se determina por el contenido de sólidos del lodo, la estabilidad del lodo, la hidrogeología del sitio (localización del manto freático y manto rocoso), pendiente del terreno y disponibilidad de terreno (CNA, 2007a).

4. Disposición en el terreno

Las incorporaciones de los lodos al terreno se consideran de manera benéfica por el abastecimiento de nutrientes y la renovación de la materia orgánica, los lodos se pueden utilizar en terrenos agrícolas, bosques, campos de pastoreo, o bien en terrenos alterados que necesiten recuperación (Torres, 2009).

El reciclaje de los lodos a través de la aplicación al terreno tiene varios propósitos: mejoran las características del suelo, tales como la textura y la capacidad de absorción de agua, las cuales brindan condiciones más favorables para el crecimiento de las raíces e incrementan la tolerancia de la vegetación a la sequía. También provee nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, incluyendo el nitrógeno y el fósforo, así como algunos micronutrientes esenciales, tales como el níquel, el zinc y el cobre, lo cual pueden servir también como una alternativa o sustituto parcial de los fertilizantes químicos. Los nutrientes contenidos en los lodos ofrecen diversas ventajas en comparación con los fertilizantes inorgánicos gracias a que pueden ser incorporados lentamente por las plantas en crecimiento. Estas formas orgánicas de nutrientes son menos solubles en agua y, por lo tanto, tienen menor probabilidad de lixiviarse al agua subterránea o ser arrastrada a las aguas superficiales (Limón, 2019).

5. Recuperación de subproductos

- Recuperación de coagulantes

Las sales de aluminio e hierro que se utilizan como coagulantes en la potabilización del agua forman a pH cercano al neutro, floculos de material polimérico de hidróxidos de los metales, que una vez sedimentados, producen unas suspensiones de lodo gelatinoso las cuales son difíciles de espesar y desaguar. Esta dificultad estriba en que los hidróxidos de los metales tienen una gran cantidad de agua atrapada dentro de la matriz de hidróxido. Por otra parte, estos hidróxidos tienen una gran solubilidad en condiciones alcalinas y ácidas fuertes. Esta situación tiene el potencial de remover los polímeros de hidróxido de las suspensiones de lodo con dos efectos benéficos (CNA, 2007a):

- Reducción del volumen y de la masa de lodo producido en la potabilizadora
- Uso benéfico del metal del coagulante

La recuperación de coagulante se puede ver, por lo tanto, desde dos puntos de vista. El primero es considerar la adición de ácido o álcali como una técnica de acondicionamiento del lodo para mejorar sus características de espesamiento, desaguado y reducción de los residuos. Otro enfoque es el de maximizar la recuperación y reusó del metal del coagulante presente en los lodos. El método usado para la extracción de los coagulantes del lodo es la aplicación de ácido sulfúrico. La cantidad de ácido requerida para la extracción es función de la concentración del metal en el lodo, la concentración de sólidos en suspensión y la concentración de otros componentes del lodo que demandan ácido, incluyendo la materia orgánica. El pH de la extracción varía de 2 a 3 cuando se pretende recuperar el coagulante. Cuando la adición del ácido es con fines de acondicionamiento del lodo el pH es de alrededor de 4. El tiempo de retención de la extracción es de 10 a 20 minutos. La concentración del coagulante recobrado varía de 58 a 3,700 mg L⁻¹ para aluminio y de 2,200 a 6,400 mg L⁻¹ para hierro. La calidad del coagulante recuperado depende de la calidad del coagulante de primer uso. Los compuestos que se presentan con mayor frecuencia en el coagulante recuperado incluyen manganeso, fierro (en el de aluminio) y carbón orgánico soluble (CNA, 2007a).

De cualquier manera, si se pretende recircular el coagulante se debe tener cuidado con los trihalometanos, el color residual, los compuestos orgánicos, y los metales pesados. La viabilidad económica de la recuperación de coagulante, no se ha demostrado en forma concluyente, razón por la cual su práctica no se ha extendido, y debe estudiarse en cada caso en particular ya que depende de la composición del agua cruda, la dosis relativa de coagulante, y los costos de tratamiento y disposición de los lodos. Este último costo depende, sobre todo, de las normas que se tengan que cumplir para la disposición de los lodos (CNA, 2007b).

Los siguientes estudios están basados en la factibilidad de recuperación del coagulante de cloruro férrico o sulfato de aluminio.

Pavón *et al.*, (2004), utilizaron dos tipos de lodo para la recuperación de coagulante, uno extraído de la planta potabilizadora de Ixtapan de la Sal en la que el coagulante utilizado es sulfato de aluminio y otro obtenido de la potabilizadora del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) ubicada en San Cayetano en la cual se utiliza cloruro férrico. Realizaron la recuperación de aluminio e hierro con ácidos nítrico, clorhídrico y sulfúrico. Los porcentajes de recobro de las especies de interés fueron al usar ácido clorhídrico en un 57% para aluminio y 94% para hierro, concluyeron que en la cuantificación de aluminio e hierro los valores fueron muy elevados 19 600 mgAl kg⁻¹ lodo y 37 000 mgFe kg⁻¹ lodo por lo tanto puede representar un daño a los ecosistemas.

Núñez y Peña (2011), estudiaron la posibilidad de recuperar el sulfato de aluminio mediante acidificación con ácido sulfúrico (25%), a partir de lodos recolectados de los sedimentadores y lavado de filtros en la planta de tratamiento de aguas de la empresa Aguas de Cartagena S.A E.S. P en dos épocas del año. Alcanzaron porcentajes de recuperación de aluminio de 60.5% en época de sequía y 71.5% en época de lluvia; a pH de 1.5 unidades y tiempo de mezcla 30 minutos, y concentraciones de recuperación de aluminio de 67.0 mg Al L⁻¹ en época de sequía y 1038.9 mg Al/L⁻¹ en época de lluvia a las mismas condiciones. La factibilidad

económica de la reutilización de la solución de coagulante recuperado en el proceso de potabilización, teniendo en cuenta: costo de equipos usados en el proceso diseñado, ahorro en materias primas debido al porcentaje de recuperación de aluminio y transporte y disposición final de lodos gracias al porcentaje de reducción de volumen de los mismos que fue de 32% en las condiciones óptimas propuestas. El análisis muestra una inversión inicial de \$135.000.000 que se recuperaría el primer año a una tasa interna de retorno, TIR, de 20% a 10 años, con una ganancia de valor presente neto (VPN) de \$8.349.818.861 lo que demuestra que es factible económicamente reutilizar el sulfato de aluminio.

Villegas *et al.* (2005), usaron lodos provenientes de la planta Pisamo I, una de las cuatro plantas de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira (Agua y Agua de Pereira, Colombia) para estudiar la recuperación de sulfato de aluminio mediante ácido sulfúrico en las diferentes rutinas de operación y mantenimiento de los sedimentadores. Alcanzando recuperaciones cercanas al 70% con lodos de vaciado y de lavado acidificados hasta pH 1.5 y agitados durante 100 minutos. Obtuvieron soluciones de concentraciones alrededor de 1500 mg L⁻¹ a partir de lodos de vaciado a pH 1.5. Debido al costo del ácido sulfúrico, la reincorporación del coagulante recuperado no resulta económicamente viable bajo las condiciones evaluadas, haciéndose necesaria la reducción del volumen del lodo para reducir costos de acidificación. Recomiendan realizar ensayos en planta piloto y en planta real, a fin de validar los resultados.

1.2 Nutrición vegetal

La nutrición es el proceso para obtener los nutrientes que hay en suelo en forma de iones inorgánicos (Pérez, 2017) suministrados como abonos o fertilizantes una vez que han sido aplicados al medio donde se desarrolla las plantas, para que una vez absorbidos, puedan crecer y desarrollarse adecuadamente. La nutrición vegetal tiene en cuenta todos los factores que influyen sobre el balance de nutrientes

minerales que realmente necesita la planta para su crecimiento, desarrollo y producción de frutos o granos. Por lo tanto, se usa a la fertilización para nutrir a los cultivos (Serrato, 2019).

1.2.1 Nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas

Pérez, (2017) menciona que el término de “nutriente esencial” fue propuesto por Arnon y Stout en 1939 concluyendo que para que un elemento sea considerado como esencial, debe cumplir con lo siguiente:

- 1.- El elemento es necesario para el óptimo crecimiento y desarrollo de la planta y su ausencia o deficiencia en el suelo provoca en la planta un síntoma característico.
- 2.- El elemento en la planta no puede ser substituido por ningún otro elemento.
- 3.- El elemento debe estar directamente involucrado en el metabolismo de la planta.

Se consideran dieciséis elementos esenciales para el crecimiento de las plantas (Ruíz, 2011) y que son obtenidos de la siguiente manera:

- a. Del aire: carbono (C) como CO₂ (dióxido de carbono);
- b. Del agua: hidrógeno (H) y oxígeno (O) como H₂O (agua);
- c. Del suelo, el fertilizante y abono: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo) y cloro (Cl).

Hay otros elementos que no son considerados esenciales pero que también se han detectado en tejidos vegetales de manera benéfica. Este es el caso del aluminio (Al), del selenio (Se), del cobalto (Co), silicio (Si) y sodio (Na) (Pérez, 2017). Estos nutrientes benéficos se han encontrado por ejemplo para la remolacha azucarera el Na, y el Si, para los cereales, fortaleciendo su tallo para resistir el vuelco. El Co es importante en el proceso de fijación de N de las leguminosas. Muchas especies del

género *Astragalus* acumulan Se, si bien no parecen tener un requerimiento especial por este nutriente. Sin embargo, se ha descrito que el Se actúa como cofactor de la enzima glutatión peroxidada, enzima antioxidante implicada en la eliminación de H₂O₂ y de peróxidos lipídicos. Se ha encontrado que el Al ha estimulado el crecimiento en la remolacha azucarera, maíz y algunas leguminosas tropicales en concentraciones que varían de 0.2 a 0.5 mg L⁻¹, también ha servido como fungicida en ciertos casos de enraizamiento (Pérez, 2017).

Algunos microelementos pueden ser tóxicos para las plantas a niveles sólo algo más elevados que lo normal. En la mayoría de los casos esto ocurre cuando el pH es de bajo a muy bajo. La toxicidad del aluminio y del manganeso es la más frecuente, en relación directa con suelos ácidos (IFA, 2002).

1.2.2 Funciones de los nutrientes en la planta

El estudio de la nutrición mineral de las plantas amerita conocer las proporciones de humedad y de materia seca en los órganos sometidos al análisis. La determinación del peso seco es indispensable, ya que el contenido de agua de los órganos vegetales está entre 6 y 90%; aunque para un órgano determinado puede variar también dependiendo de su estado de desarrollo. Entre el 90-95% del peso seco está constituido por carbono, oxígeno e hidrógeno, que son los principales constituyentes de las sustancias orgánicas que forman el cuerpo vegetal (celulosa o almidón). El 5-10% restante del peso seco corresponde a otros elementos cuya presencia es esencial para el correcto desarrollo de la planta. Se les llama nutrientes minerales, y entran en la planta, en general, en forma de iones inorgánicos disueltos en el agua que la planta absorbe por las raíces. Algunos se acumulan en la planta en cantidades considerables, son los macronutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio y azufre. Otros se encuentran en cantidades mucho menores, son los micronutrientes: hierro, cobre, cinc, molibdeno, manganeso, boro y cloro. Esta clasificación tiene una validez relativa, ya que en algunos casos algunos

macronutrientes se acumulan en cantidades menores que ciertos micronutrientes (Alegría, 2016).

1.2.2.1 Macroelementos primarios

El Nitrógeno (N) es indispensable para la vida de la planta y un factor clave en la fertilización, es absorbido del suelo bajo forma de nitrato (NO_3^-) o de amonio (NH_4^+), éste permite el desarrollo de la actividad vegetativa, (figura 1.8), en particular, causa un alargamiento de troncos, brotes y aumenta la producción de follaje y frutos, absorbido por las plantas deriva de la mineralización de la materia orgánica y la aplicación de fertilizantes. Sin embargo, un exceso de este elemento provoca un crecimiento excesivo del follaje, un escaso desarrollo en el sistema radical y un retardo en la formación de flores y frutos. La deficiencia de este elemento provoca una clorosis en las hojas inferiores y en caso de deficiencias agudas, éstas caen prematuramente y la clorosis se generaliza en toda la planta (Alegría, 2016).

El fósforo (P) es un elemento que contribuye en la formación de yemas, raíces y a la floración, así como a la lignificación. Una falta de fósforo tiene como resultado un ahogo de la planta, crecimiento lento, una reducción de la producción, frutos más pequeños y una menor expansión de las raíces (Ruíz, 2011).

El potasio (K) la mayor parte del potasio absorbido depende de la difusión del elemento y de otros factores, como contenidos muy altos de calcio y magnesio, los cuales disminuyen la absorción del potasio. Este nutriente mineral es el más abundante en el citoplasma, y su importancia fisiológica radica en el papel que juega en el metabolismo de los carbohidratos y las proteínas, aumenta el tamaño de los frutos y tiene un efecto positivo en el color y fragancia de las flores (Alegría, 2016). El K mejora el régimen hídrico de la planta y aumenta su tolerancia a la sequía, heladas y salinidad. Las plantas bien provistas con K sufren menos de enfermedades (IFA, 2002).

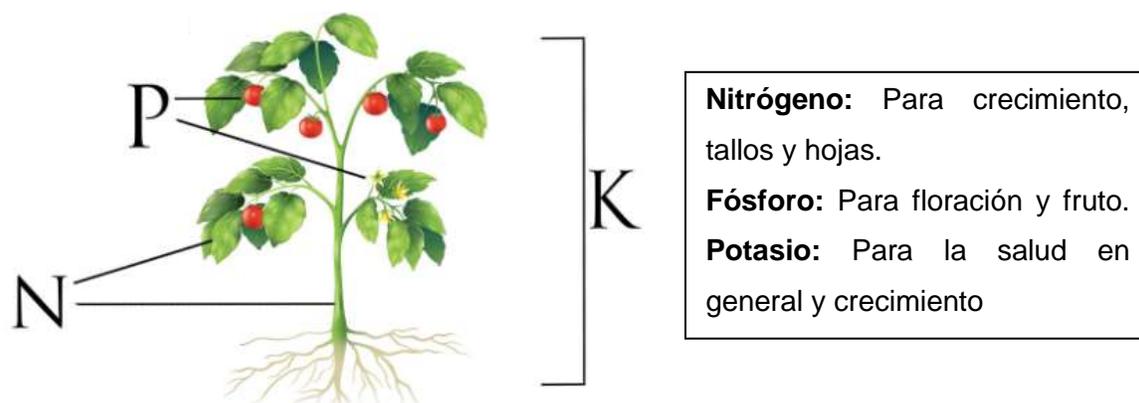


Figura1.8 Funciones de los macronutrientes en la planta

1.2.2.2 Macroelementos secundarios

El Magnesio (Mg), es el constituyente central de la molécula de clorofila e interviene también en reacciones enzimáticas relacionadas a transferencia de energía dentro de la planta, interviene en la síntesis de proteínas, en el metabolismo del fósforo, en la respiración; su absorción puede ser afectada por relaciones altas de Ca/Mg, en cuyo caso las plantas absorben menos magnesio. La deficiencia de magnesio puede acentuarse con dosis altas de potasio. La deficiencia de magnesio se caracteriza por una clorosis de las hojas bajas. Si la deficiencia continua, la clorosis se generaliza en toda la planta (Alegría, 2016).

El Azufre (S), constituye proteínas, vitaminas y es componente de numerosas enzimas, participa en la formación de la clorofila. Es constituyente de compuestos volátiles (isotiocianatos y sulfóxidos) responsables por el olor característico de algunas especies como la cebolla y el ajo (Ruíz, 2011).

El Calcio (Ca), es esencial para el crecimiento de las raíces e interviene en la estabilidad de la membrana plasmática. La mayoría de los suelos tienen suficiente disponibilidad de calcio por lo cual generalmente su aplicación al suelo se relaciona más con la reducción de la acidez. Por este motivo, también se lo denomina,

corrector de suelos. Una deficiencia de calcio puede provocar mayor absorción del magnesio, provocando síntomas de fitotoxicidad. En el caso contrario, altos contenidos de calcio regulan la absorción del potasio, evitando el consumo de lujo de este elemento (Alegría, 2016).

1.2.2.3 Microelementos

Ocho de los 17 nutrientes esenciales para las plantas se denominan microelementos y, en general, son los elementos por excelencia catalíticos, ya que son esenciales en las reacciones redox a nivel biológico. Los microelementos aceptados como esenciales son: B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni y Zn. Estos elementos son tan importantes para la planta como los nutrientes primarios y secundarios, a pesar que son requeridos en concentraciones menores a $100 \mu\text{g g}^{-1}$ de masa seca. Los elementos menores como el cobre, el zinc, el hierro y el manganeso se aplican en forma de quelatos, mientras que el boro y el molibdeno se aportan en forma de sales (Alegría, 2016).

1.2.2.4 Elementos esenciales beneficiosos

Estos elementos estimulan el crecimiento y el desarrollo en las plantas, pero no se consideran esenciales porque no cumplen con los criterios de esencialidad. Sin embargo, se ha encontrado que algunos de estos minerales son esenciales para ciertas especies de plantas, bajo condiciones específicas. Este criterio se aplica especialmente al sodio (Na), al silicio (Si) y al cobalto (Co), el selenio (Se) y el aluminio (Al) podrían ser beneficiosos para algunas plantas (Alegría, 2016).

El sodio (Na), es considerado un elemento beneficioso por tres aspectos: es esencial para ciertas especies, puede reemplazar funciones del potasio en las plantas y tiene un efecto positivo en el desarrollo vegetal. En cuanto a las funciones del sodio y el potasio, algunas plantas pueden aumentar su masa seca con sodio,

aunque existan deficiencias de potasio. El sodio se usa en tierras de pastura, ya que este mineral incrementa la aceptabilidad del forraje por parte de los animales. Pero, la absorción de grandes cantidades de sodio por las raíces puede crear dificultades para la toma de otros elementos como el potasio o el fósforo (IFA, 2002).

El silicio (Si), se ha demostrado que es beneficioso para especies de la familia *Cyperaceae* como *Equisetum arvense* y algunas gramíneas como el arroz y la caña de azúcar. En caña de azúcar, el silicio parece estar asociado a la protección contra altas intensidades lumínicas. En arroz, la deficiencia de silicio ocasiona un retraso generalizado en el desarrollo, se incrementa la transpiración y las hojas más antiguas mueren. En cuanto a la interacción con otros nutrientes, el silicio evita la toxicidad que pueda causar el manganeso, redistribuyéndolo en el tejido foliar, evitando la formación de puntos necróticos en las hojas causados por el manganeso. En forma general, el silicio mejora la resistencia contra patógenos y parásitos, y protege contra pérdidas de agua por transpiración cuticular (Pérez, 2017).

El cobalto (Co), es necesario para la fijación del nitrógeno en las leguminosas y es un mineral esencial para los rumiantes ya que es constituyente de la vitamina B12. Se ha demostrado que en ambientes pobres de cobalto la fijación del nitrógeno es escasa. En leguminosas, el cobalto está ligado a la nodulación y consecuente fijación del nitrógeno, por lo tanto, su deficiencia se refleja en la deficiencia de nitrógeno. La disponibilidad del cobalto aumenta en medios ácidos y disminuye con la presencia de óxidos cristalinos de manganeso (IFA, 2002).

El selenio (Se), es absorbido por las plantas como anión SeO_4^{2-} y forma proteínas al igual que el azufre, pero las proteínas que tienen selenio no son funcionales. Existen plantas acumuladoras de selenio en miembros de la familia *Cruciferae*, como el brócoli, pero la mayoría de las plantas cultivadas no acumulan este nutriente. En el género *Astragalus*, que es una planta acumuladora de este mineral, se encontró que el selenio previene la absorción excesiva de fosfatos a niveles

tóxicos. Pese a que no se reportan otros beneficios, este es un elemento esencial para animales y humanos (Alegría 2016).

El aluminio (Al), en el caso de éste elemento es importante conocer la forma química en que se encuentra en la solución del suelo porque algunos cationes trivalentes son tóxicos para las plantas, como el caso del Al^{3+} . La solubilización del aluminio está asociada con el grado de acidificación del suelo causada por el lavado de los iones Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} entre otros factores. En la figura 1.9 se muestran las distintas especies de aluminio con relación al pH como el Al^{3+} a $\text{pH} \leq 5.0$, $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$, a $\text{pH} = 5.5 - 7.0$ y $\text{Al}(\text{OH})^{4-}$ a $\text{pH} = 7.0 - 8.0$. Los iones polivalentes como el aluminio son insolubles en lípidos y, por lo tanto, la membrana plasmática sería una barrera para que el aluminio penetre. Sin embargo, algunos iones logran penetrar la membrana como ligandos de aluminio (neutros), por endocitosis (mecanismo por el cual las células introducen moléculas grandes), a través de enlaces entre las proteínas y las membranas o en partes lesionadas de la membrana, en concentraciones elevadas afecta al desarrollo radical, limitando una adecuada nutrición (Panizza, 2009). El ión Al^{3+} es capaz de competir con los nutrientes como el Ca, Mg y de esta manera limitar la nutrición vegetal; el Al^{3+} inhibe en mayor grado la entrada de cationes divalentes (Ca^{2+}), respecto a los monovalentes (K^+ y NH_4^+) y que en contraste estimula la entrada de aniones (NO_3^- y PO_4^-) (Nobile, 2006). Los síntomas de lesiones por Al no son siempre fáciles de determinar, ya que a nivel foliar se parece a deficiencias de P impidiendo el crecimiento general, observándose plantas pequeñas, color verde oscuro en las hojas, madurez tardía, tallos, hojas y conductos de las hojas de color púrpura, amarillamiento y muerte de las puntas de las hojas; en raíces se cuenta, la reducción del tamaño radical y la reducción o inhibición del crecimiento del eje principal de las raíces, donde el blanco primario del Al sería la cofia radical, las raíces son usualmente gruesas y quebradizas, además las puntas principales, así como de las laterales, pueden tornarse gruesas y de color café (Carreño y Chaparro, 2013).

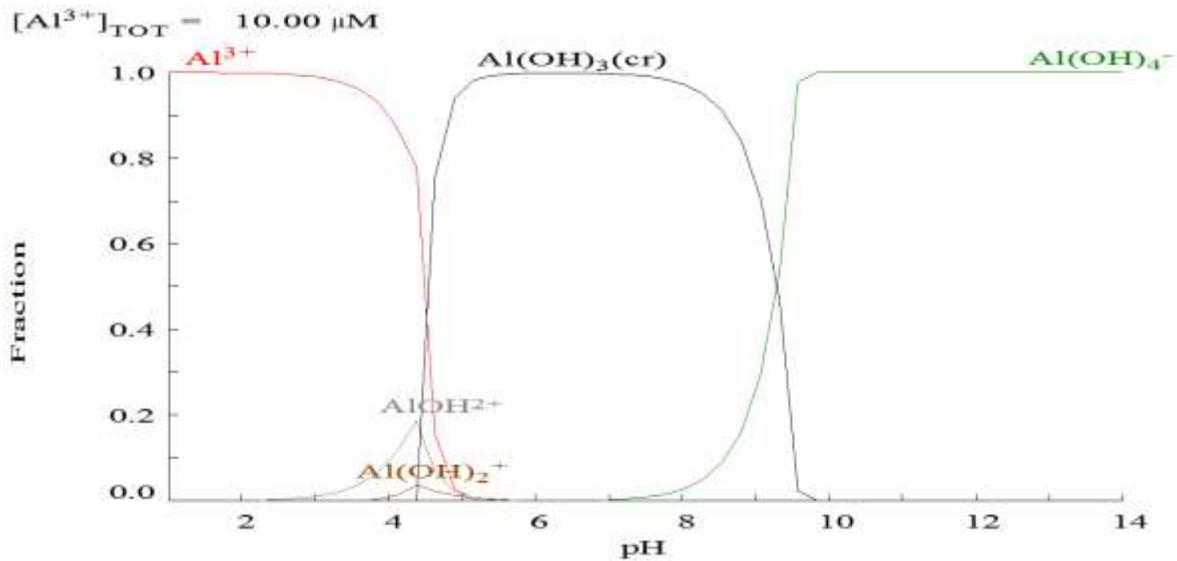


Figura 1. 9 Distribución del Al^{3+} en agua y las especies de Al(OH)_n para $100 \mu\text{M}$ de aluminio total

Diversos estudios sobre los mecanismos de adaptación al Al, han sido desarrollados para mejorar la productividad de los cultivos en suelos ácidos. Estos mecanismos de adaptación pueden ser separados en: a) la exclusión del Al, (figura 1.10) y b) la inactivación interna del Al. En general, las especies de plantas que han desarrollado mecanismos del primer tipo son llamadas aluminio- exclusoras, y aquellas que han desarrollado mecanismos internos son llamadas aluminio –acumuladoras (Nobile, 2016), y el principal mecanismo de exclusión es la exudación de ácidos orgánicos (ácido málico, ácido cítrico, oxalatos, malato, citrato, entre otros) a nivel radical, porque promueven que el aluminio forme quelatos. La composición de los ácidos orgánicos depende de la especie, la edad de la planta y el tipo de tejido. En las especies acumuladoras forman complejos con los ácidos orgánicos (Panizza, 2009).

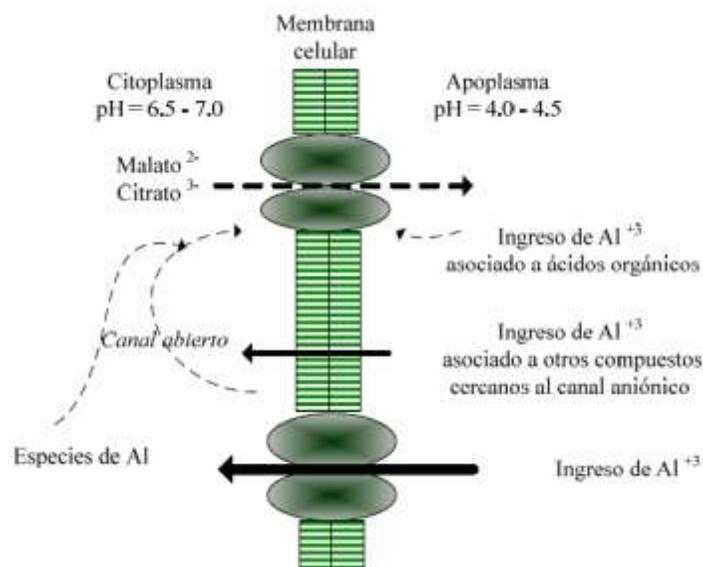


Figura 1.10 Posible mecanismo de resistencia a la toxicidad del aluminio por medio de la exclusión de éste (Panniza, 2009).

En la tabla 1.6 se indica la forma de absorción de los elementos esenciales de macronutrientes, micronutrientes y beneficiosos

Tabla 1.6 Elementos esenciales, formas de absorción y composición aproximada en las plantas (Ruíz, 2011).

Elemento	Símbolo	Formas de absorción	Por 100 g de materia seca (g)
Carbono	C	CO ₂	40-50
Oxígeno	O	O ₂ y H ₂ O	42-44
Hidrogeno	H	H ₂ y H ₂ O	6-7
Macronutrientes			
Nitrógeno	N	NO ₃ ⁻ y NH ₄ ²⁻	1-3
Fósforo	P	H ₂ PO ₄ ⁻ y HPO ₄ ²⁻	0.05-1
Potasio	K	K ⁺	0.3-3
Nutrientes secundarios			
Magnesio	Mg	Mg ²⁺	0.03-0.8
Azufre	S	SO ₄ ²⁻	0.1-0.5

Calcio	Ca	Ca ²⁺	0.5-3.5
Micronutrientes			
Hierro	Fe	Fe ²⁺	100-1000 ppm
Cloro	Cl	Cl ⁻	100 ppm
Cobre	Cu	Cu ²⁺	4-30 ppm
Manganeso	Mn	Mn ²⁺	50-300 ppm
Zinc	Zn	Zn ²⁺	10-20 ppm
Molibdeno	Mo	MoO ₄ ²⁻	0.1-5.9 ppm
Boro	B	BO ₃ ⁻ o B ₄ O ₇ ²⁻	5-75 ppm
Beneficiosos			
Sodio	Na	Na ⁺	10 ppm
Níquel	Ni	Ni	3 ppm
Aluminio	Al	Al ³⁺	0.2-0.5 ppm
Cobalto	Co	Co ²⁺	Trazas

1.3 Fisiología vegetal

Estudia el funcionamiento de las plantas, que es lo que sucede en ellas que explica que están vivas (Barceló citado por Pérez, 2017) menciona que la fisiología vegetal estudia la respuesta de las plantas vivas, o partes vivas de la misma frente a agentes externos o internos variables, así como el examen de los mecanismos internos mediante los cuales realizan sus múltiples y complejos procesos de síntesis química y la forma en que se integran estos mecanismos. También se ocupa de los factores climáticos del medio y de las interacciones de las plantas con los organismos relacionados con ellas, en cuanto dichos organismos influyen y modifican el curso del desarrollo del vegetal.

Margulis y Sagan, (2019) distinguen las siguientes fases de la relación fisiológica vegetal con la nutrición de las plantas: Absorción, transporte de agua y sales minerales (nutrientes disueltos) desde la raíz hasta el xilema, transporte de agua y sales minerales por el xilema, transporte de materia orgánica por el floema,

intercambio de gases en las hojas, fotosíntesis, respiración celular y excreción de los productos de desecho del metabolismo. En la figura 1.11 se observan las partes de la planta donde se llevan a cabo estos procesos.

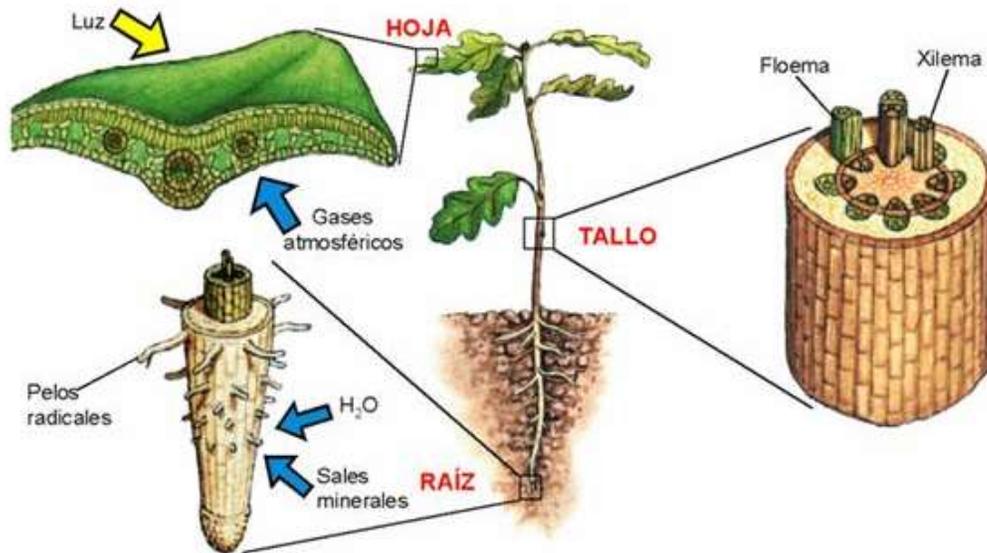


Figura 1.11 Mecanismos externos e internos para la nutrición de la planta

En el caso de la absorción, transporte de agua y sales minerales desde la raíz hasta el xilema, es a través del suelo por los espacios rellenos de aire y agua por los pelos absorbentes, localizados en la pilífera de la raíz ver figura 1.12 para que posteriormente los nutrientes atraviesen los tejidos de la raíz hasta llegar al xilema (Pérez, 2017).

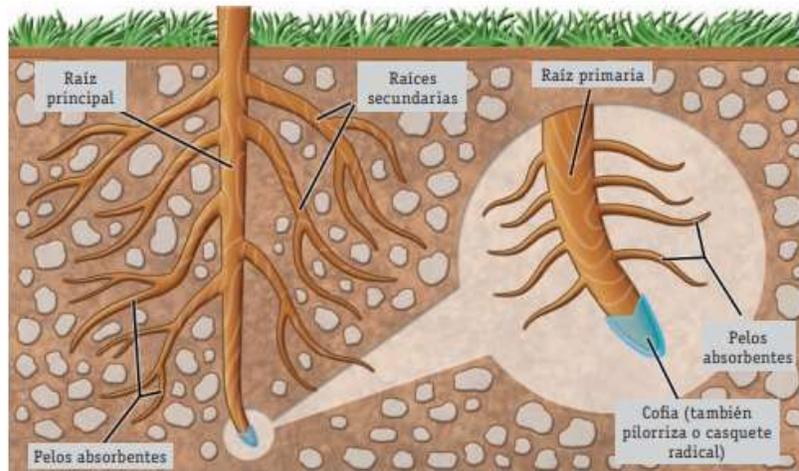


Figura 1.12 Estructura externa de la raíz

El movimiento del agua y las sales desde la epidermis de la raíz hasta el xilema del cilindro vascular puede seguir dos vías: simplástica, es decir, pasando de célula a célula a través de los plasmodesmos. Como la concentración de sales minerales en el suelo es menor que la concentración de sales en el interior de la planta, su ingreso en las células se realiza por transporte activo, a través de unas proteínas transportadoras que se encuentran en las membranas celulares y supone un coste energético (ATP) para la planta. El agua penetra en los tejidos de la raíz por ósmosis. La apoplástica aprovecha los grandes espacios intercelulares existentes entre las células parenquimáticas cortical, sin embargo, al llegar a la endodermis, ambos caminos convergen, debido a que esta capa resulta infranqueable por la vía extracelular. Los espacios intercelulares de la endodermis están fuertemente sellados por la banda de Caspari, un cinturón de suberina, sustancia muy impermeable que envuelve las paredes radial y transversal de estas células, (figura 1.13) (Margulis y Sagan, 2019).

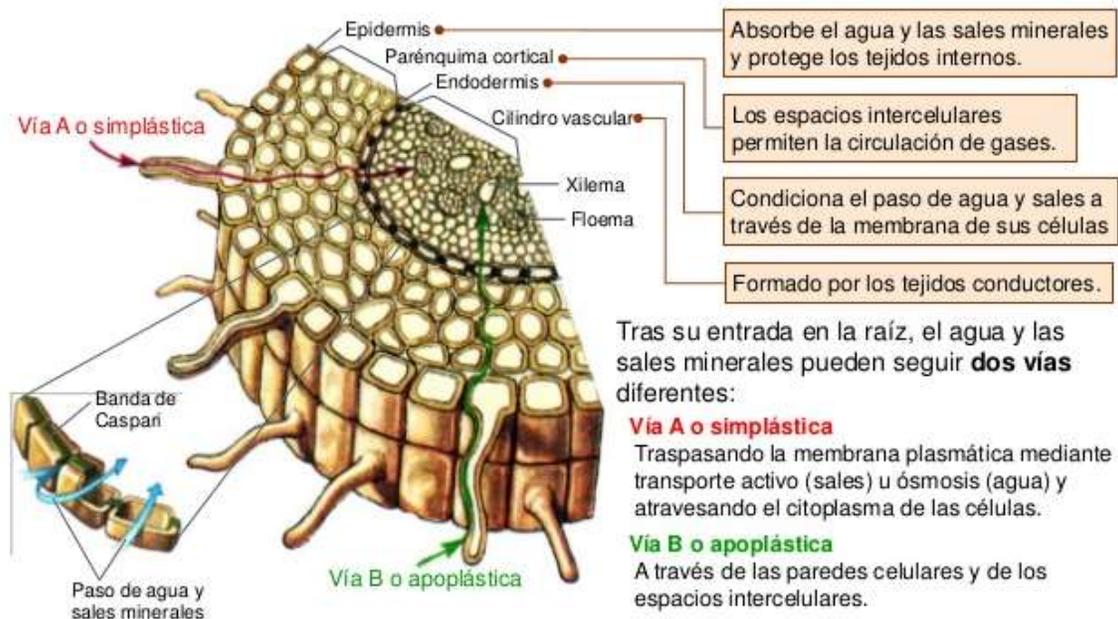


Figura 1.13 Estructura interna de la raíz.

Las sales minerales y el agua forman la savia bruta, que recorre grandes distancias a lo largo del xilema hasta llegar a las hojas, donde se realiza la fotosíntesis. El movimiento de la savia bruta es debido al mecanismo de cohesión- tensión, la tensión que origina la transpiración del agua y la cohesión existente entre sus moléculas. La pérdida de agua en forma de vapor a través de los estomas de las hojas origina un déficit hídrico que genera una fuerza de succión que eleva la savia bruta.

1.3 Fertilizantes

Los fertilizantes son productos orgánicos o inorgánicos que contienen al menos uno o más nutrientes que las plantas necesitan para su desarrollo. La distribución del fertilizante se puede realizar manualmente, mediante máquinas (abonadoras) o a través del sistema de riego (fertirrigación). En cualquiera de los casos anteriores la

aplicación se puede hacer sobre todo el terreno o sólo sobre parte del mismo (fertilización localizada) (Arévalo y Castellano, 2009).

1.3.1 Fertilizantes químicos inorgánicos

Son productos inorgánicos obtenidos mediante procesos químicos, elaborados en laboratorios o fábricas. Los fertilizantes químicos inorgánicos incrementan impresionantemente el rendimiento de las plantas, ofrecen una gran cantidad de nutrientes fácilmente disponibles; este hecho hace el uso de fertilizantes nitrogenados altamente atractivos; pero esto también tiene sus limitaciones, de hecho, la mitad de los fertilizantes nitrogenados aplicados se pierde mediante la escorrentía, la lixiviación y la volatilización. También se producen impactos negativos en el suelo y en la salud de las plantas porque reduce la colonización de las raíces por parte de los hongos benéficos llamados micorriza, la alta utilización de nitrógeno frena la fijación de nitrógeno por parte de las *Rhizobium*, la descomposición de la materia orgánica es acelerada lo cual conduce a la degradación de la estructura de estos y a una mayor vulnerabilidad a la sequía (IFOAM, 2009).

1.3.1.1 Clasificación de los fertilizantes químicos inorgánicos

Según el contenido de uno o varios elementos principales de N, P y K, los fertilizantes se clasifican de la siguiente manera:

1) Fertilizantes simples: Contienen solamente uno de los tres elementos primarios en su composición; estos a su vez pueden ser: nitrogenados, fosfóricos o fosfatados, potásicos.

2) Fertilizantes compuestos: Contienen más de un elemento en su composición (Alvarado *et. al.*, 2000).

a) Mezclas.

Se llaman mezcla cuando han sido obtenidos por una mezcla mecánica o manual (los elementos nutritivos están juntos, pero en partículas distintas).

b) Complejos.

Se llaman complejos cuando los distintos elementos pertenecen a una misma fórmula química (los elementos nutritivos están juntos en una misma partícula). Que a su vez se clasifican en binarios y terciarios.

- **Binarios.** Contienen dos elementos en su composición: N, y P, N y K, P y K.
- **Terciarios.** Contienen tres elementos en su composición. Se expresan las concentraciones con las mismas unidades fertilizantes señaladas. Así, una que tenga un N-P-K de 10-30-10 significa que posee:

10 kg de nitrógeno neto (N).

30 kg de anhídrido fosfórico (P_2O_5).

10 kg de dióxido de potasio (K_2O).

1.3.1.2 Composición de los fertilizantes químicos inorgánicos

La composición de un fertilizante es la cantidad de nutriente que contiene. En los fertilizantes las unidades que se consideran para el cálculo de su composición son los que se muestran en la tabla 1.7. Así, 1 kg de “unidad fertilizante” de nitrógeno corresponde a 1 kg de nitrógeno neto; 1 kg de “unidad fertilizante” de potasio corresponde a 1 kg de óxido de potasio (Navarro, 2007).

Tabla 1.7 Caracterización de los fertilizantes químicos (Ruíz, 2011).

Elemento	Unidad fertilizante	Símbolo o fórmula
Nitrógeno	Nitrógeno	N
Fósforo	Anhidro fosfórico	P ₂ O ₅
Potasio	Oxido de potasio	K ₂ O
Magnesio	Oxido de magnesio	MgO
Calcio	Oxido de calcio	CaO
Azufre	Azufre	S
Boro	Boro	B
Cloro	Cloro	Cl
Manganeso	Manganeso	Mn
Zinc	Zinc	Zn
Hierro	Hierro	Fe
Molibdeno	Molibdeno	Mo

La concentración, es la cantidad del elemento nutritivo en su respectiva unidad realmente asimilable por la planta. Se expresa en porcentaje (%) del total del peso del fertilizante. Así, el sulfato de amonio, (NH₄)₂ SO₄, posee un 21 % de N, es decir 21 kg de unidad fertilizante por cada 100 kg de fertilizante (los 79 kg restantes lo componen el azufre, hidrógeno y oxígeno). A partir de la concentración de un fertilizante y conociendo la necesidad en kg del elemento, se determina la cantidad de aplicación del mismo, mediante la siguiente fórmula (Ruíz, 2011):

$$Cantidad\ de\ fertilizante = \frac{Cantidad\ del\ elemento}{Concentración\ de\ fertilizante} (100) \quad (3)$$

1.3.1.3 Presentación de los fertilizantes químicos inorgánicos

La presentación del fertilizante determina a menudo las condiciones de utilización y la eficacia del mismo. Los fertilizantes se presentan en estado sólido o líquido. Los sólidos pueden ser en polvo, cristalinos, granulados (permite que la distribución mecánica sea uniforme. El 90% de las partículas presenta diámetro entre 1 y 4 mm. La forma deseable es la esférica), perlado (granulado de tamaño muy uniforme). Los líquidos pueden ser aplicados a los cultivos, ya sea al momento de la siembra o después de la emergencia. Son formulaciones que se logran elaborar a través de la mezcla de diferentes materiales que contienen los nutrientes necesarios para el desarrollo de los cultivos. Se presentan en forma de suspensiones para ser diluidas en agua y aplicados a los cultivos.

1.3.2 Fertilizantes orgánicos o abonos orgánicos

El abono orgánico es el material resultante de la descomposición natural de la materia orgánica por acción de los microorganismos presentes (Ramos y Terry, 2014) y la necesidad de disminuir la dependencia de productos químicos artificiales en los distintos cultivos, está obligando a la búsqueda de alternativas fiables y sostenibles. En la agricultura ecológica, se le da gran importancia a este tipo de abonos, y cada vez más se están utilizando en cultivos intensivos. No podemos olvidar la importancia que tiene el mejorar algunas características físicas, químicas y biológicas del suelo y, en este sentido, este tipo de abonos juega un papel fundamental (Arévalo y Castellano, 2009).

1.3.2.1 Clasificación de los abonos orgánicos

Los abonos orgánicos pueden dividirse en dependencia de la fuente de nutrimentos, el grado de procesamiento, y su estado físico (sólido o líquido), según se observa en la tabla 1.8.

Tabla 1.8 Clasificación de los abonos orgánicos (Ramos y Terry, 2014).

Fuente de nutrientes	Grado de procesamiento	Sólido	Líquidos
Materia orgánica	Sin procesar	<i>Residuos vegetales:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Residuos de cosecha • Residuos de poda • Residuos de postcosecha <i>Residuos de animales:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Estiércoles frescos • Residuos de mataderos y otros <i>Coberturas:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Abonos verdes y mulch 	<i>Efluentes:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Pulpa de café • Desechos de origen animal • Otros residuos líquidos (lodos)
	Procesados	<ul style="list-style-type: none"> • Compost • vermicomposta • Bocashi • Ácidos húmicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Biofermentos • Té de compost • Ácidos húmicos • Té de estiércol • Extracto de algas

Lugo *et al.* (2017) menciona que los lodos son considerados residuos sólidos orgánicos (RSO) y que su actual manejo y disposición, da lugar a su aplicación en campos agrícolas como abono debido a su contenido de nutrientes, sin embargo, la presencia de contaminantes como compuestos orgánicos, metales pesados y patógenos los hace inapropiados y bajo este contexto se plantean limitaciones para su uso como abonos, por lo que recomienda llevarlos a un grado de procesamiento como compost o vermicomposteo el cual permite la conversión de diversos residuos orgánicos en productos orgánicos estables a través de una biodegradación aeróbica de la materia orgánica por medio de las lombrices de tierra y microorganismos. Mas sin embargo los lodos sin procesar quedarían clasificados como abonos orgánicos líquidos y pueden ser aprovechables.

1.3.2.2 Aprovechamiento de lodos enfocados al suelo

El aprovechamiento de los lodos implica su uso en cualquier actividad que represente un beneficio. Si bien la utilización de lodos en alguna actividad específica puede estar determinada por la influencia de factores ambientales, así como el

origen de las aguas tratadas, la utilización de los lodos en ciertos usos específicos dependerá en las actividades que se lleven a cabo en la zona o zonas de posible aprovechamiento (Espejel, 2007)

En Bogotá en el decreto 1287/14 define en su artículo 8 las alternativas de uso o aprovechamiento de los lodos por categoría (Aldana y Pérez, 2017); en México existe una categoría similar y esta especificada por la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Categoría A

- a. Como material de cobertura, relleno o adecuación de zonas verdes (cementerios, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos).
- b. Como producto térreo para uso en áreas privadas (jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización).
- c. Como abono en procesos de agricultura.

Categoría B

- a. Como abono en procesos de agricultura; aplicado al suelo con algunas restricciones.
- b. Como abono en plantaciones forestales.
- c. Como acondicionador de suelos en la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados.
- d. Como insumo en la elaboración de fertilizantes orgánicos (abonos) o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original.
- e. Para remediación de suelos contaminados, lechos biológicos para el tratamiento de emisiones y vertimientos o soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración, absorción y adsorción.
- f. Como insumo en la fabricación de materiales de construcción.
- g. Como material para la estabilización de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial secundaria o terciaria.

Ramírez *et al.* (2017) realizaron un estudio para determinar las opciones viables de aprovechamiento de estos residuos de la planta potabilizadora “Los Berros”, del Sistema Cutzamala en el Estado de México. Reportando que las principales opciones de aprovechamiento de lodos que se aplicarían en plantas potabilizadoras a nivel de planta piloto son:

- 1) Elaboración de cemento-clinker.
- 2) Aplicación en suelos (elaboración de brechas cortafuego en suelos forestales, en menor grado, aprovechado como mejorador de suelos en invernaderos)
- 3) Elaboración de productos de la construcción (tabicones)
- 4) Elaboración de productos cerámicos de alfarería (vasijas ornamentales y ladrillos)
- 5) Elaboración de adsorbentes y catalizadores a base de alúmina
- 6) Recirculación de lodos en el tren de tratamiento de plantas potabilizadoras.

Las cuatro mejores opciones de aprovechamiento del lodo fueron: 1) aplicación en suelos (66-67.5%); 2) elaboración de cemento-clinker (65% para lodo espesado); 3) elaboración de tabicones y productos cementantes 62.6% para lodo deshidratado, y 4) productos cerámicos (55.1%). A continuación, se muestra otros estudios enfocados al aprovechamiento de los lodos de potabilización en el ámbito cementero y cerámico en los últimos años.

Cerón *et al.*, (2007), realizaron formulaciones de mezclas binarias y terciarias empleando lodo y materiales cementantes (cemento, cal, yeso y mortero), especímenes de tabicones y ladrillos. Las mezclas binarias, compuestas por 90% lodo y 10% cemento y 90% lodo y 10% cal, presentaron valores altos de resistencia a la compresión (153.63 kg cm^2 y 144.13 kg cm^2 respectivamente), con respecto al reportado para morteros tipo I y concretos de relleno (125 kg cm^2). La mejor mezcla ternaria compuesta por 90% lodo, 5% yeso y 5% cemento, presentó un valor de 109.6 kg/cm^2 , superior al valor recomendado en normas técnicas para un mortero

tipo II (75 kg cm^2). Los resultados obtenidos para tabicones y ladrillos fueron menos alentadores. Con base en estos resultados, se determinó que el lodo es un material que posee una aceptable viabilidad técnica para ser utilizado en este tipo de materiales.

Husillos (2012), caracterizó los residuos que se generan en el ciclo urbano del agua y estudió su posible reutilización en las distintas fases del proceso de fabricación del cemento Portland. Obteniendo que la fracción orgánica del lodo atomizado (solo contienen 5% de humedad) del proceso de potabilización, interfiere en el proceso normal de hidratación del cemento, retrasando su fraguado. La adición de lodos al cemento aumenta el agua de consistencia normal de la pasta y las resistencias de pastas y morteros se reducen drásticamente. Concluyendo que la reutilización de los lodos atomizados como adición al cemento no es válida.

Espejel (2007), determinó la factibilidad técnica, económica, social y ambiental al valorar los lodos procedentes de la planta potabilizadora “Los Berros” del Sistema Cutzamala (PPLB) para elaborar productos cerámicos (ladrillos). Las condiciones óptimas de elaboración de productos cerámicos fueron: 27 % lodo en la pasta cerámica; tamaño de grano del lodo: $271 \mu\text{m}$ y, temperatura de cocción: 1227.5°C . Bajo estas condiciones, los valores de las variables de optimización fueron: densidad, 1.6 g/cm^3 ; porcentaje de absorción de agua, 13.4 % y porcentaje de contracción por cocción 10 %. Estos valores fueron similares a los medidos a un testigo (producto cerámico de tipo comercial). Para estas condiciones óptimas en la estimación de la factibilidad económica, se determinó que, cuando se utiliza lodo para elaborar ladrillos, los costos por concepto de materiales, disminuyen en un 4.38 % comparado con la elaboración de ladrillos utilizando solo arcilla roja y arena.

En el aspecto ambiental y social, se determinó que es altamente factible la utilización de lodos para la elaboración de ladrillos. Los impactos ambientales negativos encontrados son poco persistentes. Por lo que de manera global los lodos de la PPLB presentan una aceptable factibilidad técnica, económica, social y

ambiental, para ser valorados como materia prima para elaborar productos cerámicos, bajo condiciones óptimas de operación.

1.3.2.3 Aplicación de lodos como mejoradores de suelo

La reutilización de los lodos en suelos agrícolas aporta beneficios únicos de fertilización por su contenido en nutrientes y por la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo gracias al aporte de materia orgánica. Para que los beneficios sean los adecuados en el suelo y no se produzcan efectos dañinos en el rendimiento vegetal se debe realizar una correcta dosificación de los lodos. Sin embargo, los lodos pueden contener sustancias que pueden ser dañinas para los seres humanos al entrar en la cadena alimentaria, como por ejemplo los metales pesados, los cuales están limitados por la legislación española en el uso de lodos como enmienda orgánica (Pérez, 2016). España es uno de los países con mayor porcentaje de utilización de lodos con fines agrícolas (60%) al igual que Suecia (60%) y U.S.A. (44%). No obstante, la utilización de los lodos de depuradora en suelos agrícolas está limitada por obstáculos sociales y técnicos. Técnicamente los problemas se deben a que se producen lodos durante todo el año, pero su utilización en los cultivos se realiza únicamente una o dos veces al año, por lo tanto, se deben almacenar. Por otro lado, existe una falta de aceptación social, debido a que los agricultores no confían en una enmienda orgánica de origen residual, pensando que les puede perjudicar, en muchos casos motivada por la falta de información al consumidor (Peréz, 2016).

Dayton y Basta (2001), caracterizaron diecisiete lodos del tratamiento de agua potable recogidos de los municipios de Oklahoma, como sustituto de suelo, mediante la comparación de las propiedades físicas, químicas y nutrientes. El bioensayo se realizó con tomate (*Lycopersicon esculentum*). Los metales pesados fueron extraídos de los lodos según la toxicidad de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, procedimiento característico de lixiviación.

Kim *et al.*, (2002) trataron un suelo ácido con lodo de alumbre de una planta de purificación de agua a una tasa de 0 a 18%. Se cultivó mostaza india (*Brassica juncea*) en el suelo tratado en un invernadero durante 5 semanas y se regó con agua a pH 4 durante el crecimiento. Se determinaron cambios en las propiedades del suelo, la química del lixiviado, el crecimiento de las plantas y la absorción de los elementos por el tratamiento del lodo. El tratamiento del lodo aumentó la capacidad de amortiguación a la acidez, la conductividad hidráulica, la capacidad de retención de agua y la adsorción de fosfato del suelo y disminuyó la densidad aparente y la movilidad de las partículas pequeñas. El tratamiento del lodo redujo la lixiviación de Al, Mg, K, Na y Mn, pero aumentó la lixiviación de Ca. El tratamiento del lodo también aumentó la cantidad de biomasa y mejoró el alargamiento de la raíz. La planta absorbió una menor cantidad de cationes y P, pero una mayor cantidad de Ca con el tratamiento de lodos. Se promovió el crecimiento de la mostaza india, dado que aumentó el peso de la hoja y la raíz y se mejoró el alargamiento de la raíz. En el experimento a corto plazo, se encontró que la aplicación de lodo de alumbre de la planta de purificación de agua a un suelo ácido es segura y beneficiosa para el crecimiento de las plantas a pesar del riego con agua ácida.

Moodley *et al.*, (2004) estudiaron el efecto de la adición de lodos de alumbre en la retención de agua y la conductividad hidráulica de dos suelos en KwaZulu-Natal, Sudáfrica, a tres años en un experimento y dos años en un segundo experimento, las diferencias entre los tratamientos fueron medibles. Los experimentos mostraron que, en ambos tipos de suelo, aumentó la retención de agua y la conductividad hidráulica, pero que la mejora en ambas propiedades solo fue significativa a la tasa de aplicación de 1280 mg/ha. Por lo tanto, se deben agregar cantidades muy altas de lodos de alumbre para modificar estas propiedades físicas de los suelos.

En 2005 Novak y Watts emplearon un residuo de tratamiento de agua a base de alumbre puede reducir las concentraciones de fósforo en tres suelos llanos costeros con exceso de fósforo. Tres suelos que contenían concentraciones elevadas de

fósforo Mehlich-3 (M3P) ($145\text{--}371\text{ mg kg}^{-1}$) y fósforo soluble en agua (WSP) ($12,3\text{--}23,5\text{ mg kg}^{-1}$) se incubaron en laboratorio con WTR entre 0 y 6% (masa/masa) durante 84 días. La incorporación de WTR en los tres suelos causó una reducción casi lineal y significativa en las concentraciones de M3P y WSP del suelo. En dos suelos, la aplicación de WTR al 6% causó una disminución de la concentración de M3P del suelo por debajo del nivel de umbral de P del suelo. Se requirió una incubación adicional en el tercer suelo usando WTR más alto para los tratamientos del suelo (10-15%) para reducir la concentración media de M3P del suelo a 178 mg kg^{-1} . Después de la incubación, la mayoría de los tratamientos tuvieron una disminución de menos de la mitad de la unidad de pH y un ligero aumento en los valores de CE del suelo, lo que sugiere un impacto mínimo en las propiedades de calidad del suelo. Los resultados mostraron que la incorporación de WTR en suelos con altas concentraciones de P causó reducciones relativas mayores en WSP extraíble que las concentraciones de M3P. Las reducciones relativas más grandes en la fracción extraíble de WSP sugieren que WTR puede ser más efectivo para reducir las pérdidas potenciales de P de escorrentía que el uso como una enmienda para reducir las concentraciones de M3P.

Salcedo *et al.* (2007), evaluó diferentes dosis de lodos de aguas residuales sanitarias como abono orgánico en la producción de maíz y sobre el desarrollo inicial de *Pinus douglasiana*. Los experimentos los estableció en un suelo volcánico ubicado en la zona centro de Jalisco, México. En el cultivo de maíz se evaluó 10 y 20 t·ha⁻¹ de lodos deshidratados, así como 10 y 20 t·ha⁻¹ de compost de lodos mezclados con residuos de jardinería. Los materiales los distribuyó homogéneamente sobre el suelo bajo un diseño experimental de bloques al azar con cinco repeticiones. Evaluó el rendimiento de grano en los tratamientos con lodos residuales y compost, se incrementó significativamente, en 18 y 22% respectivamente, con respecto al control. En la plantación de *Pinus douglasiana* se evaluaron 00, 30, 60 y 100g de lodos por árbol. A los 14 meses de la plantación registró una supervivencia de hasta 83% en las parcelas con mayor dosis de lodos, mientras que en el control la supervivencia fue de 67%, indicando que la aplicación

de lodos de aguas residuales sanitarias como abono orgánico mejoró la producción de maíz y el crecimiento inicial de *Pinus douglasiana* en suelos volcánicos.

Díaz *et al.* (2010), evaluaron la eficiencia de tres dosis (0.424 g, 1.061 g 1.7 g) de dos tipos de lodos obtenidos de plantas potabilizadoras (“La Campiña II” e “Isleta”) en el tratamiento de un suelo salino-sódico (44.13 g) usando columnas de suelo en el laboratorio. Determinando que ambos tipos de lodos mejoraron significativamente la velocidad final de infiltración (VFI) respecto a las muestras sin recibir tratamiento. En el caso del lodo “La Campiña II”, la dosis de 1.061 g presentó la mejor VFI y en las dosis de lodo “Isleta” estas fueron igualmente eficientes, pero es necesario controlar el uso de este tipo de lodo como mejorador de suelo sódico debido a su alta concentración de aluminio. Se concluye que este estudio hace viable su uso en suelos con problemas de sodicidad, especialmente para mejorar la permeabilidad.

Ruiz (2011), desarrolló el estudio de la influencia de los lodos de la planta de tratamiento “Casigana” como aditivo para suelos de cultivo, específicamente con maíz (*Zea mays*) y brócoli (*Brassica oleracea*) como plantas de control. Al comparar los resultados de los parámetros medidos (altura, calibre, y número de hojas), determinó que el mejor tratamiento para el maíz y brócoli fue de 6 kg m² + 50% de fertilizante químico. Debido a que, en el proceso de potabilización del agua, se utiliza policloruro de aluminio, fue necesario hacer una experimentación final acerca de la concentración de aluminio existente en las plantas de maíz y brócoli para su respectiva recomendación; obteniéndose concentraciones de entre 0.206 ppm a 0.42 ppm de Al³⁺ para el maíz y 0.25 ppm a 0.77 ppm de Al³⁺ para el brócoli. Al contrastar estos resultados con los permitidos por la Agencia de protección del medio ambiente de Estados Unidos de Norteamérica (EPA), recomienda un límite de 0.05 a 0.2 mg L⁻¹ para aluminio en agua potable, se determina que los cultivos no son aptos para el consumo humano. Recomendando utilizar cultivos excluidos

de aluminio, como rábano y trigo, o extraer el policloruro de aluminio de los lodos residuales.

Lugo *et al.* (2017) evaluaron mezclas de lodo residual y estiércol equino en diferentes porcentajes, por medio de vermicomposteo, para conocer su estabilidad y proponerlo como mejorador de suelo. Utilizó cuatro porcentajes de estiércol equino y lodo residual: E₁₀₀, E_{85-LR₁₅}, E_{70-LR₃₀} y E_{55-LR₄₅} y dio un seguimiento de 90 días bajo condiciones de invernadero. La mejor relación que encontró fue E_{70-LR₃₀}, ya que presentó un balance en el aporte de N y C, la concentración de metales pesados disminuyó para Cu, Zn, Ni y Cd, además el pH que presentó (7.24 ± 0.1) fue neutro, la concentración de P se incrementó considerablemente y el número de lombrices fue mayor (1790) con respecto a los otros tratamientos, por lo que esta relación es adecuada para su uso como abono orgánico.

Kluczka *et al.*, (2017) realizaron un estudio con el objetivo de estimar el peligro de contaminación del suelo por formas biodisponibles de aluminio y metales pesados debido a un lodo de alumbre que era un subproducto del agua, y tecnología de tratamiento de aguas residuales con aluminio. En los resultados obtenidos reportan que el lodo posterior a la coagulación utilizado como fertilizante natural es una fuente secundaria de aluminio biodisponible, especialmente cuando se utilizan coagulantes de aluminio durante el tratamiento de aguas y aguas residuales.

Burnham *et al.*, (2017) patentaron la invención que describe un nuevo método para tratar lodos, que puede dar como resultado la producción de fertilizantes inorgánicos aumentados orgánicamente con alto contenido de nitrógeno que incorpora lodos municipales o biosólidos o lodos orgánicos que pueden competir con los fertilizantes tradicionales como el fosfato de amonio, el sulfato de amonio y la urea en el mercado de fertilizantes básicos. El método aprovecha la propiedad tixotrópica de los biosólidos deshidratados o lodos orgánicos para crear un material en forma de pasta bombeable a partir de los biosólidos o lodos orgánicos que luego se trata con un oxidante para reducir los efectos de olor y un ácido. Esta mezcla luego interactúa

con ácidos sulfúricos y/o fosfóricos concentrados y una fuente de amoníaco o, alternativamente, una masa fundida o sal caliente o sulfato de amonio/fosfato para formar una mezcla de fertilizante. La invención también puede ser un complemento de la producción comercial de sales de amonio. El fertilizante producido por la invención contiene entre el 8 y el 15 % en peso de nitrógeno. La invención está orientada a adaptarse a la producción de biosólidos para plantas de tratamiento de residuos municipales individuales a fin de mantener pequeñas las plantas de fabricación de fertilizantes. La patente tiene como cesionario actual a Anuvia Plant Nutrients Corporation.

1.4 Sustratos

Infoagro, (2019) indican que el sustrato es todo material sólido, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, distinto del suelo, que colocado en un contenedor - en forma pura o en mezcla permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando, por tanto, un papel de soporte para la planta. El sustrato puede intervenir (material químicamente activo) o no (material inerte) en el complejo proceso de la nutrición mineral de la planta. Hoy en día no se recomienda el uso de suelo mineral como un componente de sustratos para macetas, aun y cuando con un manejo cuidadoso puede dar excelentes resultados. Esta recomendación se debe particularmente a razones que incluyen: falta de una distribución uniforme de las partículas y consecuente pobre porosidad (diámetro pequeño de poros); un drenaje pobre; propiedades químicas variables; portador potencial de insectos, malezas y enfermedades, además pueden contener también residuos químicos (pesticidas, herbicidas) y niveles altos de sales o iones tóxicos (Cabrera, 1998).

1.4.1 Tipos de sustratos

Existen diferentes criterios de clasificación de los sustratos, basados en el origen de los materiales, su naturaleza, sus propiedades, su capacidad de degradación, entre otros (Infoagro, 2017).

- **Según sus propiedades:** Son determinados por la capacidad de intercambio catiónico o la capacidad de almacenamiento de nutrientes por parte del sustrato. Los sustratos químicamente inertes actúan como soporte de la planta, no interviniendo en el proceso de adsorción y fijación de los nutrientes, por lo que han de ser suministrados mediante la solución fertilizante. Los sustratos químicamente activos sirven de soporte a la planta, pero a su vez actúan como depósito de reserva de los nutrientes aportados mediante la fertilización almacenándolos o cediéndolos según las exigencias del cultivo (Infoagro, 2017). Por lo que se mencionan algunos sustratos inertes y activos.

- Sustratos químicamente inertes: Peñate (2011), arena granítica o silícea, grava, roca volcánica, perlita, arcilla expandida, lana de roca, entre otros.

- Sustratos químicamente activos: Peñate (2011), turbas rubias y negras, corteza de pino, vermiculita, materiales ligno-celulosicos, entre otros.

- **Según su origen de los materiales:** La mayoría de los sustratos usados en la producción de plantas ornamentales consisten en una combinación de componentes orgánicos e inorgánicos (Infoagro, 2019).

- **Materiales orgánicos.**

- De origen natural. Se caracterizan por estar sujetos a descomposición biológica (turbas).

- De síntesis. Son polímeros orgánicos no biodegradables, que se obtienen mediante síntesis química (espuma de poliuretano, poliestireno expandido, etc.).
- Subproductos y residuos de diferentes actividades agrícolas, industriales y urbanas. La mayoría de los materiales de este grupo deben experimentar un proceso de compostaje, para su adecuación como sustratos (cascarillas de arroz, pajas de cereales, fibra de coco, orujo de uva, cortezas de árboles, serrín y virutas de la madera, residuos sólidos urbanos, lodos de depuración de aguas residuales, etc.).

- **Materiales inorgánicos o minerales.**

- De origen natural. Se obtienen a partir de rocas o minerales de origen diverso, modificándose muchas veces de modo ligero, mediante tratamientos físicos sencillos. No son biodegradables (arena, grava, tierra volcánica, etc.).
- Transformados o tratados. A partir de rocas o minerales, mediante tratamientos físicos, más o menos complejos, que modifican notablemente las características de los materiales de partida (perlita, lana de roca, vermiculita, arcilla expandida, etc.).
- Residuos y subproductos industriales. Comprende los materiales procedentes de muy distintas actividades industriales (escorias de horno alto, estériles del carbón, etc.).

1.4.2 Características del sustrato ideal

El mejor medio de cultivo depende de numerosos factores como son el tipo de material vegetal con el que se trabaja (semillas, plantas, esquejes etc.), especie vegetal, condiciones climáticas, sistemas y programas de riego y fertilización, aspectos económicos, etc. Para obtener buenos resultados durante la germinación, el enraizamiento y el crecimiento de las plantas, se requieren las siguientes características (Peñate, 2011).

- **Propiedades físicas:** Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible, suficiente suministro de aire, distribución del tamaño de las partículas que mantenga las condiciones anteriores, baja densidad aparente, elevada porosidad, estructura estable, que impida la contracción (o hinchazón del medio).

- **Propiedades químicas:** Baja o apreciable capacidad de intercambio catiónico, dependiendo de la fertirrigación que se aplique, suficiente nivel de nutrientes asimilables, baja salinidad, elevada capacidad tampón y capacidad para mantener constante el pH, mínima velocidad de descomposición.

- **Otras propiedades:** Libre de semillas de malas hierbas, nematodos y otros patógenos y sustancias fitotóxicas, reproductividad y disponibilidad, bajo costo, fácil de mezclar, fácil de desinfectar y estabilidad frente a la desinfección, resistencia a cambios externos, físicos, químicos y ambientales.

1.4.3 Descripción general de los sustratos utilizados

Perlita

Material obtenido como consecuencia de un tratamiento térmico a unos 1000-1200 °C de una roca silíceo volcánica del grupo de las riolitas. Se presenta en partículas blancas cuyas dimensiones varían entre 1.5 y 6 mm, con una densidad baja, en general inferior a los 100 kg/m³. Posee una capacidad de retención de agua de hasta cinco veces su peso y una elevada porosidad; su C.I.C. es prácticamente nula (1.5-2.5 meq/100 g); su durabilidad está limitada al tipo de cultivo, pudiendo llegar a los 5-6 años. Su pH está cercano a la neutralidad (7- 7.5) y se utiliza a veces, mezclada con otros sustratos como turba, arena, etc (Infoagro, 2017).

Turba (Peat moss)

Peñate, (2011) menciona que el peat moss está formado por restos de vegetación acuática, de pantanos o marismas, que han sido conservados debajo del agua en estado de descomposición parcial. La falta de oxígeno en los pantanos hace más baja la descomposición bacteriana y química del material vegetal. La descomposición de los diversos depósitos de turba varía mucho, dependiendo de la vegetación de que se originó, su estado de descomposición contenido de minerales y grado de acidez. La turba de musgo se deriva de musgos *Sphagnum*, *Hypnum* y otros musgos. Varían de color, pardo claro a pardo oscuro, tiene una alta capacidad de retención de humedad, una acidez elevada (pH de 3.3 a 4.5) y contienen una pequeña cantidad de nitrógeno (alrededor de 1.0 %) pero poco a nada de fósforo o potasio

Así mismo Infoagro (2017), cita que las turbas son materiales de origen vegetal, de propiedades físicas y químicas variables en función de su origen. Se pueden clasificar en dos grupos: turbas rubias y negras. Las turbas rubias tienen un mayor contenido en materia orgánica y están menos descompuestas, las turbas negras están más mineralizadas teniendo un menor contenido en materia orgánica. Es más frecuente el uso de turbas rubias en cultivo sin suelo, debido a que las negras tienen una aireación deficiente y unos contenidos elevados en sales solubles. Las turbas rubias tienen un buen nivel de retención de agua y de aireación, pero muy variable en cuanto a su composición ya que depende de su origen. La inestabilidad de su estructura y su alta capacidad de intercambio catiónico interfiere en la nutrición vegetal, presentan un pH que oscila entre 3.5 y 8.5. Se emplea en la producción ornamental y de plántulas hortícolas en semilleros.

1.5 Hortensia (*Hydrangea macrophylla* L.)

La hortensia común, *Hydrangea macrophylla* L., es originaria del Pacífico central, especialmente la isla japonesa de Honshu. *Hydrangea* es un término que se deriva del griego y significa “vaso de agua”, en su alusión a las altas exigencias hídricas. Desde China fue llevada a Inglaterra en 1789, convirtiéndose pronto en una de las plantas favoritas de los jardines ingleses y adquiriendo a partir de ahí popularidad en el resto del mundo (Arango, 2003).

Es una planta de fácil adaptabilidad a diferentes entornos, abundantes en flores y de características fuertes que hacen frente a los cambios climáticos inesperados. Si bien el clima templado y de condiciones húmedas favorece su crecimiento y su mayor expresión genética, son completamente resistentes a los ambientes secos (Villanueva, 2018).

Según González (2014), las hortensias producen flores desde el inicio de primavera hasta finales de otoño; éstas se encuentran agrupadas en racimos en el extremo de los tallos. Cada flor individual de hortensia es relativamente pequeña; sin embargo, el despliegue de color está acrecentado por un círculo de brácteas modificadas alrededor de cada flor, ver figura 1.13. Sus flores pueden ser rosas, blancas, o azules, dependiendo en parte del pH del suelo. En suelos relativamente ácidos, con pH entre 4.5 y 5, las flores se hacen de púrpura a azules; en suelos más alcalinos, con pH entre 6 y 6.5, las flores adquieren un color rosa; y en suelos alcalinos con pH alrededor de 8, las flores crecen blancas

1.5.1 Clasificación botánica de la hortensia

Escobar (2013), menciona que la hortensia es de la familia Hydrangeaceae, del género: *Hydrangea* y la especie: *H. macrophylla*. El género *Hydrangea* comprende

23 especies, principalmente originarias de Asia, generalmente la mayoría de las especies son poco conocidas y han sido poco estudiadas; las especies más importantes para la floricultura son *Hydrangea macrophylla* (Thunb), *Hydrangea paniculata* (Villanueva, 2018).

Según González (2014), la hortensia es un arbusto ramificado y en algunos casos también trepador. Presentan una gran variabilidad de tamaños, desde plantas enanas hasta enormes con varios metros de altura y consta de las siguientes estructuras:

- **Tallos:** Los tallos son robustos, pero poco leñosos y de forma cilíndrica.
- **Hojas:** Las hojas son dentadas y opuestas en la mayoría de las especies. En otras variedades se pueden encontrar hojas lobuladas, ovales, acuminadas e incluso muy alargadas. Se distribuyen 3 hojas por cada nudo del tallo.
- **Flores:** Las flores se disponen en inflorescencias con varios ejes que soportan las flores individuales. Se reúnen en grandes corimbos terminales que aparecen sobre la madera del año anterior. La flor individual es relativamente pequeña. Alrededor de ésta se encuentran una serie de brácteas que son las que dan color a la planta. La gama de colores es muy extensa (roja, rosa, púrpura, blanco, azul, etc.). Las flores se desarrollan a partir de yemas formadas el año anterior, (figura 1.14).

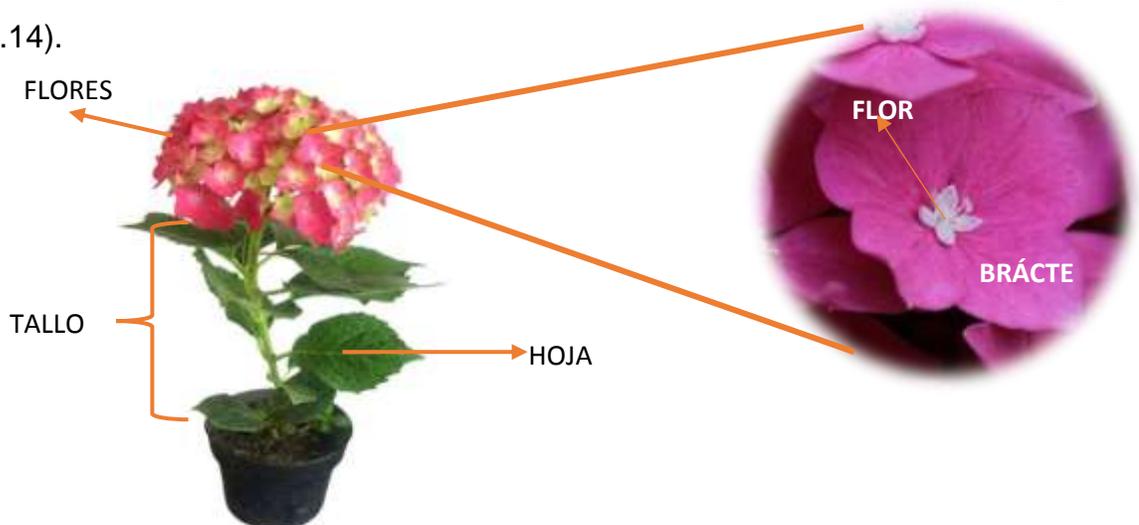


Figura 1.14 Partes de la planta de hortensia

1.5.2 Condiciones edafoclimáticas

En condiciones adecuadas una hortensia puede vivir de 8 a 10 años cuando se cultiva en macetas. En cambio, si se planta en plena tierra su vida es indefinida ya que las raíces tienen espacio ilimitado para extenderse y la planta no envejece.

a) Temperatura: La hortensia es una planta de temperaturas frescas, que crece óptimamente a temperaturas diurnas entre 18 y 20°C y con temperaturas nocturnas entre 11 y 15°C y. Bajo estas condiciones produce tallos largos, follaje vigoroso y grandes flores. Es necesario proteger la planta de heladas ya que no tolera temperaturas inferiores a los 4°C (Villanueva, 2018).

b) Luz: La hortensia es una planta que prefiere una intensidad lumínica moderada, por lo cual requiere, en condiciones tropicales y subtropicales un nivel de sombrero entre 30 y 40%, es preciso mantener más de 20000 lux durante la fase de iniciación. Los días cortos, combinados con temperaturas altas aceleran la formación de botones florales. Por otra parte, a temperaturas entre 15 y 18°C las plantas son prácticamente indiferentes al fotoperiodo. La floración puede ser inducida por factores ambientales y relacionados con la fertilización; por ejemplo, los niveles bajos de nitrógeno promueven la formación del botón. Señala que es deseable que en la fase inicial de la floración las plantas estén moderadamente deshojadas (esto se logra retirando la mayoría del follaje del tercio basal de la planta) y que reciban poca o ninguna sombra (Villanueva, 2018).

c) Humedad y riego: La planta necesita grandes aportaciones de agua y humedad constante. Se debe evitar el encharcamiento ya que ésta favorece la aparición de enfermedades criptogámicas y asfixia radicular. Las hortensias sometidas a estrés hídrico se recuperan rápidamente; sin embargo, es importante evitar esta condición que puede incidir más tarde en la longitud y calidad de las flores (Villanueva, 2018).

d) Sustrato: El contenido en materia orgánica debe ser elevado. Los sustratos deben drenar bien ya que la planta sufre con los encharcamientos. El pH del suelo influye decisivamente en la coloración azul (pH 4.5 a 5) o rosa (pH 6 a 6.5) de las brácteas o sépalos (Villanueva, 2018).

1.5.3 El cultivo en maceta

Un buen sustrato es esencial para la producción de plantas de alta calidad. Dado que el volumen de una maceta es limitado, el sustrato y sus componentes deben de poseer características físicas y químicas que, combinadas con un programa integral de manejo, permitan un crecimiento óptimo (Cabrera, 1995).

Las propiedades físicas son consideradas como las más importantes para un sustrato (Ansorena y Miner, 1994). Esto es debido a que, si la estructura física de un sustrato es inadecuada, difícilmente podremos mejorarla una vez que se ha establecido el cultivo. En cambio, las propiedades químicas sí pueden ser alteradas posterior al establecimiento del cultivo. Por ejemplo, si un sustrato no posee un pH o el nivel nutricional adecuado, éstos pueden mejorarse añadiendo mejoradores o abonos. Similarmente, un exceso de sales solubles puede remediarse con un lavado (o lixiviado) con agua de baja salinidad (Cabrera, 1998). Una planta que crece en maceta enfrenta condiciones diferentes a las que enfrenta una que crece en el suelo. La tabla 1.9 ilustra esas diferencias.

Tabla 1.9 Comparación de las características fisicoquímicas del cultivo en suelo y maceta (Moran, 2004).

Características fisicoquímicas del cultivo en maceta y suelo de un cultivo		
Factor	Cultivo en maceta (sustrato en contenedor)	Suelo (cultivo en suelo)
Retención de humedad	De capacidad de contenedor a marchitamiento en 1 a 3 días	De capacidad de campo a marchitamiento en 1 a 3 semanas
Aireación	De baja a alta en un día	De adecuada a alta la mayoría del tiempo
Nutrición	De alta a baja en una semana	De alta a baja a lo largo de la temporada
pH	Cambio de 1 a 2 unidades en una a 3 semanas	Relativamente constante a lo largo de la temporada
Salinidad	Problemas crónicos en una a 4 semanas	De baja a alta a lo largo de la temporada
Temperatura	Cambio de 10 a 30 °C en un día	Relativamente constante a lo largo de la temporada

e) Multiplicación

La hortensia es una planta fácil de propagar por medios vegetativos, las estacas y esquejes enraízan y brotan fácilmente, siempre y cuando se encuentren con humedad, temperatura y luminosidad adecuadas. La multiplicación se realiza a partir de esquejes de 8-10 cm de longitud, aunque si no se dispone de suficiente material vegetal pueden emplearse esquejes de menor tamaño, cogiendo 1 cm a cada lado de la hoja y dividiendo el tallo en dos partes de forma longitudinal; no obstante, estos últimos tardan más tiempo en dar una planta vendible. Los esquejes se colocan sobre sustrato de turba, turba y arena o arena sola, aunque a veces también se emplea la tierra de brezo, lo importante es que el sustrato este bien

drenado. Con calor de fondo de 18-20 °C el trasplante podrá llevarse a cabo a los 30-40 días (Ballester *et al.* 1997).

Puede aplicarse ácido indol-butírico (AIB) para favorecer el enraizamiento, y una vez que éste se produzca, se trasplanta a maceta de 10 cm. Para plantas plurifloras de dos años el esquejado se realiza de abril a junio, para las de un año, de enero a marzo y para las unifloras algo más tarde que en el caso anterior.

1.5.4 Nutrición y coloración de las flores

La hortensia es una planta de requerimientos nutricionales intermedios, que además son específicos según el color de las flores que se desee producir ver figura 1.15.

NIVELES TENTATIVOS DE ABSORCIÓN					
DE NUTRIENTES PARA EL CULTIVO DE HORTENSIA (Osorio 2014)					
Hortensia (<i>Hydrangea</i> sp.)	Niveles adecuados en el suelo	AZUL 	BLANCA 	ROSADA 	Porcentajes de saturación que Tolera el cultivo
pH	5,2-5,7	4,5	5,5	6	
CE (dS/m)	0,5-1	0,5	0,8	1	
M.O. (%)	5-10	5,0	5	10	
CICef (cmolc/g)	10-15	10,0	10	15	
Ca (cmolc/kg)	6-11	6,0	9	11	
Mg (cmolc/kg)	2-3,75	2,0	2,5	3,8	
K (cmolc /kg)	0,5-0,8	0,8	0,7	0,6	
Al (cmolc /kg)	≤ 1,5	1,5	0	0	
P (Bray II)	20-40	20,0	30	50	
S	6-12	6,0	9	12	
Fe	50-100	100,0	75	50	Sat. Ca(%) 60-70%
Mn	5-10	10,0	10	10	Sat. Mg(%) 20-25
Cu	2-5	5,0	5	5	Sat. K (%) 5-5,5
Zn	5-7	7,0	7	7	Sat. Al (%) <15
B	0,5-1	0,5	0,7	1	
NO ₃	30-50	10,0	20	50	
NH ₄	20-30	30,0	30	10	

Figura 1.15 Niveles tentativos de absorción de nutrientes para el cultivo de Hortensia (Mejía, 2015).

En la producción de hortensias es importante comprender los efectos de la fertilización sobre el cambio de color en las brácteas o sépalos, de rosa a azul. Los sépalos de todas las hortensias excepto las blancas tienen un pigmento rojo que se torna a azul al reaccionar con el aluminio. Así, la disponibilidad relativa de este elemento es el principal factor determinante sobre el color de las brácteas. La disponibilidad de nitrógeno promueve la presencia de sépalos de color rosa claro, mientras que los niveles bajos de potasio, promueven sépalos azules claros, aunque exista suficiente aluminio disponible en el sustrato (Arango, 2003).

La disponibilidad de aluminio es un factor determinante sobre el color de los sépalos excepto en las variedades blancas. La disponibilidad de aluminio está directamente relacionada con el pH de la solución del suelo: entre 5-5.5 es alta y los sépalos

pueden ser azules; mientras que con rangos de 6.0-6.5, éstos conservan un color rosa. El fósforo también interfiere con la absorción de aluminio; los niveles altos de este elemento, así como los de nitrógeno promueven la presencia de sépalos de color rosa claro, mientras que los niveles bajos de ambos combinados con abundante potasio, promueven sépalos azules claros, aunque exista suficiente aluminio disponible en el sustrato. Por lo tanto, en el cultivo de hortensia en maceta sí se desea una coloración rosa se tiene que evitar el aluminio en el sustrato, para ello no se debe usar suelo mineral, ni perlita, ni fertilizantes con aluminio. Se aplicarán cantidades relativamente altas de fósforo y un abonado adecuado sería aplicar en el agua de riego 150 ppm N (20-10-20) alternado con 100 ppm N (11-53-00, fosfato monoamónico) cada tres veces. Mantener el pH entre 6-6.2, ya que una acidez más baja facilita la disponibilidad del aluminio y un pH más alto genera clorosis férrica; para bajar el pH lo mejor es usar ácido fosfórico. De lo contrario, si se requiere tener hortensias con brácteas o sépalos azules se tiene que aplicar riegos con aluminio a dosis > 100 ppm, mantener pH del agua de riego 5-5,2 usando ácido sulfúrico y un abonado que mantenga un moderado nivel de nitrógeno, alto de potasio y bajo de fósforo (Mejía, 2015).

1.5.5 Control de plagas y enfermedades

Las plagas y enfermedades en la producción de plantas de ornato constituyen un riesgo para la producción. Es importante conocer los ciclos de vida de los patógenos y plagas de estas últimas saber cuánto dura su ciclo, cuantas etapas comprende, cuáles son sus hábitos, qué les gusta, qué no les gusta, en qué momento son más susceptibles de controlar, cuánto daño nos puede causar y en qué etapa, cuáles son sus tasas de multiplicación, cuantos ciclos tienen por mes, por año. No existe en el mercado un plaguicida “total”, que sea capaz de matar “todo” (huevecillos, larvas, pupas, ninfas, quistes, adultos), es decir los plaguicidas sólo “matan” en una o algunas etapas del ciclo de vida de una plaga, pero no todas, esto garantiza que

siempre habrá sobrevivientes (con su respectiva resistencia) que continúen perpetuando la especie y causando los daños consecuentes (Villanueva, 2018).

Se explica el modo de acción de insecticidas IRAC y fungicidas FRAC (Villanueva, 2018) que sirven para las plagas que se lleguen a presentar en el cultivo de hortensia.

Áfidos: *Aphis* spp.

El daño causado por áfidos se puede llegar a confundir con el de thrips porque también causa deformación en los tejidos. El áfido comúnmente se encuentra en los cogollos (hojas en desarrollo), se mueve muy lentamente y se puede observar a simple vista, ver figura 1.16.



Figura 1.16 Áfidos

Control cultural

Las prácticas culturales recomendadas para el control de los áfidos son el monitoreo directo semanal al cultivo, el control de malezas y un manejo adecuado de residuos.

Control biológico

Según (Villanueva, 2018).

- Utilización de jabón de coco, emulsiones orgánicas y aceites vegetales
- Extractos de chile-ajo, extractos de ruda, extracto de tabaco, extracto de neem.
- *Beauveria bassiana*

- *Lecanicilium lecanii*

Control químico

- Lambda Cyhalotrina, sólo algunos productos comerciales permitidos por la RAS (IRAC 3)
- Imidacloprid (IRAC 4)
- Aldicarb (IRAC 1)
- Milbemectin (IRAC 5)

Mildeo polvoso (ceniza): *Sphaerotheca pannosa* (Wallr. ex Fr). Lév. [Anamorfo: *Oidium leucoconium* Desm.], Sinónimo de *Erysiphe pannosa*. La fase anamorfa o asexual *Oidium sp.* es la que comúnmente afecta la hortensia (Villanueva, 2018) (figura 1.17).



Figura 1.17 Mildeo polvoso u oidio en hoja de hortensia.

Control cultural

Para controlar esta enfermedad se recomienda monitorear cada semana el cultivo, deshojar las plantas más afectadas, pues pueden servir de fuente de inóculo y diseminación de la enfermedad, manejar correctamente los residuos orgánicos, fertilizar adecuadamente con los niveles ideales de nitrógeno y potasio, también es necesario controlar la humedad en el cultivo y en la sala de poscosecha; en los

cultivos se deben hacer los drenajes necesarios para evitar lotes encharcados, además el tema de la poda es importante porque mantiene a las plantas aireadas con un microclima apropiado para su sanidad. En las salas de postcosecha se debe propiciar un ambiente frío para evitar la deshidratación de las flores y la proliferación de patógenos, la temperatura ideal es de 0 a 2°C (Villanueva, 2018).

Control biológico

- Aspersión con extractos de plantas, con caldos bordelés (sulfato cúprico + cal hidratada), productos del compostaje del material vegetal.
- Polisulfuro de calcio
- *Bacillus subtilis*
- *Lecanicillium lecanii*

Control químico

- Flutriafol (FRAC G1)
- Difenonazole (FRAC G1)
- Azufre (FRAC M)
- Oxiclورو de cobre (FRAC M1)
- Yodo polivinil pirrolidona (FRAC UN)
- Polisulfuro de calcio (FRAC UN)
- Azoxistrobin

1.5.6 Importancia y tendencia del cultivo de hortensia en maceta

En México, son cuatro los estados que concentran 86.9% de la producción de flores y plantas, como el estado de México con 61.3% de la producción, Puebla con 14.5%, Morelos con 7.3% y La Ciudad de México (CDMX) con 3.8%, esto descrito por El

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en su última actualización en 2015 (López, 2018).

Inicialmente la Hortensia llegó a Europa proveniente de Japón y desde ese momento empezó a cobrar fuerza debido a su comercialización en Francia, Inglaterra y Alemania principalmente, países dentro de los cuales se desarrollaron una gran variedad de posibilidades de decoración e incentivado por esto, se por lo cual se incentivó el cultivo de este tipo de flor, a partir de ese momento, los cultivadores empezaron a desarrollar variedades más vigorosas y resistentes a plagas y enfermedades, y con diferentes características en color, forma, cultivos. El género *Hydrangea* comprende 23 especies, la mayoría de las especies son poco conocidas y han sido poco estudiadas; las especies más importantes para la floricultura son: *Hydrangea macrophylla* (Thunb), *Hydrangea paniculata*. *Hydrangea macrophylla* (López y González, 2017).

De cualquier modo, la hortensia, teniendo unos mínimos de cuidados, se puede dar en cualquier parte de España, exceptuando las zonas del interior donde por el crudo frío invernal no se podrían obtener flores. El cultivo de hortensia en maceta tiende a aumentar el número de variedades de tipo cima globular y racimosa. *Hydrangea macrophylla* «Innocence», es una nueva variedad registrada como marca comunitaria que supone una auténtica revolución única en el mercado, ya que florece varias veces de mayo a octubre y se caracteriza por ser muy resistente al frío, ser su flor mucho más dura que las otras y por su particularidad de ir aumentando de tamaño (Namesny, 2010).

Otras especies de hortensia se están haciendo cada vez más hueco en nuestros mercados son *H. quercifolia* u hortensia de hoja de roble, impresionante arbusto procedente de ciertas áreas de Norteamérica que además de panículas de flores color blanco roto nos regala la maravilla de un follaje original que permanece en intenso tono ladrillo desde mediado el otoño hasta casi el fin del invierno. Otra especie es *H. paniculata*, cuyo nombre específico es revelador del tipo de

inflorescencia que emite, esta vez también en el mismo tono que la anterior, pero con variedades en blanco puro muy hermosas. Sin olvidarnos de *H. serrata*, *H. arborescens* o *H. aspera* (Valdeón, 2008).

2 MÉTODO

En la figura 2.17 se presenta un bosquejo de la metodología llevada a cabo.

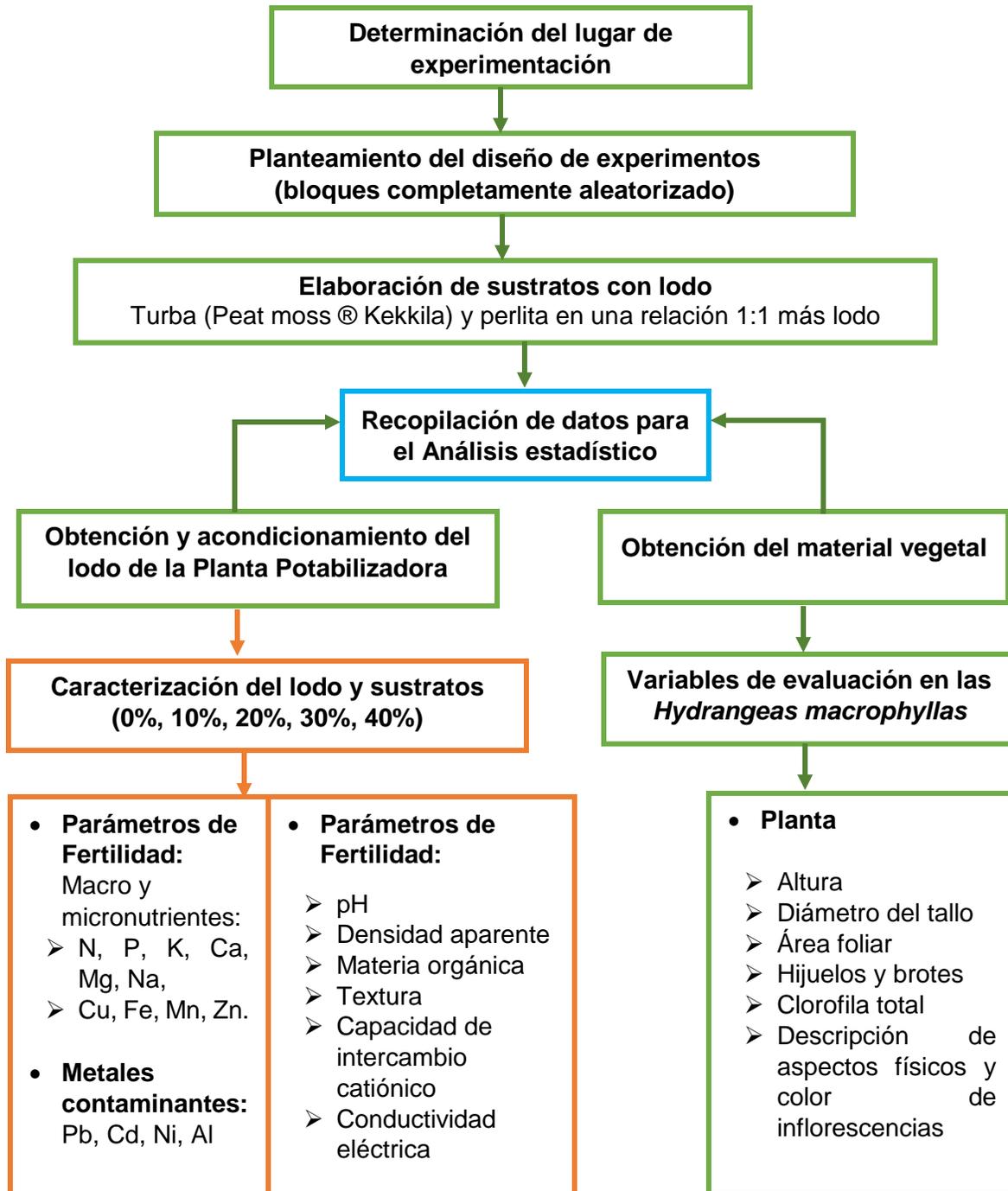


Figura 2. 18 Esquema general de la metodología

2.1 Lugar de experimentación

La investigación se realizó de junio a septiembre del 2019 en las instalaciones del Centro Universitario UAEM, que se localiza en el Km 1.5 de la carretera Tenancingo-Villa Guerrero a 18° 97' 03" N y 99° 61' 17" O y a una altitud de 2200 msnm, al sur del Estado de México.

2.2 Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completamente aleatorizado; con seis bloques, cinco tratamientos de diferentes concentraciones de lodo: 0%, 10%, 20%, 30% 40% (v/v), (figura 2.19) y ocho repeticiones, la unidad experimental fue una planta en cada maceta y de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

Dónde:

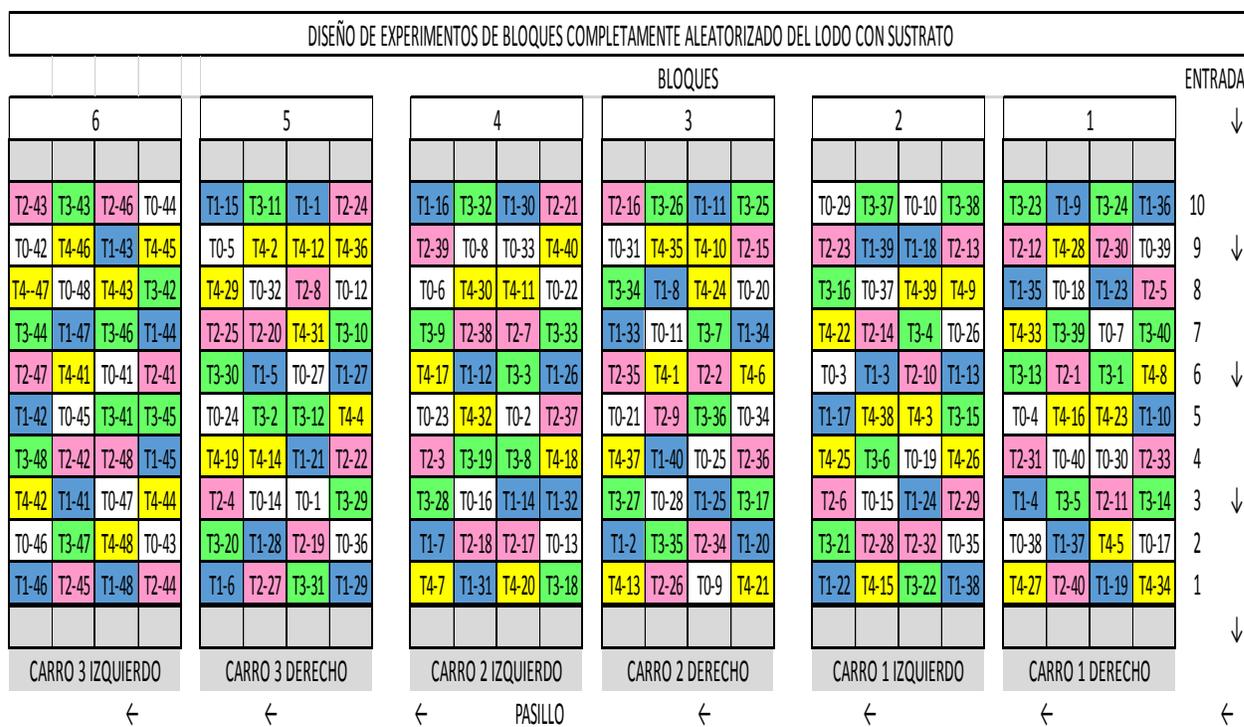
Y_{ij} = Es la medición que corresponde al tratamiento (i) y al bloque (j)

μ = Media global poblacional

τ_i = Efecto del tratamiento i

γ_j = Efecto del bloque j

ε_{ij} = Error aleatorio atribuible a la medición Y_{ij}



TRATAMIENTOS	T0=0%	T1= 10%	T2=20%	T3=30%	T4=40%
Repeticiones	8	8	8	8	8
Bloques: 6					

Figura 2.19 Diseño experimental por bloques completamente aleatorizado de diferentes sustratos utilizando lodo (0, 10, 20,30, 40%) para el desarrollo de hortensia.

2.2.1 Elaboración de sustratos utilizando diferentes cantidades de lodo

Una vez seco el lodo se elaboraron 5 sustratos ver figura 2.20, para ellos se utilizó turba (Peat moss® Kekkila) y perlita, en una relación 1:1 (v/v) para cada uno de los tratamientos, (tabla 2.10) para permitir una buena retención de humedad, aireación y disponibilidad de nutrientes para la raíz.

Tabla 2.10 Relación de la mezcla de sustratos

TRATAMIENTO	PERLITA	LODO	TURBA	TOTAL
	%			
T0	50	0	50	100
T1	45	10	45	100
T2	40	20	40	100
T3	35	30	35	100
T4	30	40	30	100

**Figura 2.20** Mezcla de los sustratos: perlita, turba y lodo

2.3 Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las variables descritas se capturaron en Excel 2016 y se compararon con el programa estadístico Minitab® 19 en un análisis de varianza ($\alpha=0.05$), en las diferencias significativas se realizó la comparación de medias Tukey ($\alpha=0.05$). También se realizó un análisis de correlación entre variables.

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_i$$

H_a : al menos el efecto de un tratamiento es diferente de los demás

2.4 Obtención del lodo de la planta potabilizadora

El lodo se obtuvo de la planta potabilizadora con clarificación convencional localizada en el km 54.5 de la carretera Toluca-Valle de Bravo, Los Berros, Villa de Allende, Estado de México a 19° 23' 30.5 N, 100° 04' 38.2" W. El lugar específico fue la presa de lodos, donde el lodo es almacenado hasta saturación de la presa para posteriormente almacenarlo en las tarquinas. Se muestreo un aproximado de 2 m³ de lodo en tambos de plástico de 200 litros al 80% de su capacidad, figura 2.21.



Figura 2.21 Obtención del lodo de manera manual en la planta potabilizadora (presa de lodos).

2.4.1 Acondicionamiento del lodo

Los 2 m³ de lodo se secaron en el campo experimental del Tecnológico de Estudios Superiores de Villa Guerrero (TESVG), (figura 2.22) se extendieron sobre una lona de asbesto blanca de poro cerrado de 32 m² de superficie, hasta lograr una capa de 6 cm de grosor durante 24 días. Una vez seco el lodo se molió con un molino de mano, proceso que duró 8 días hábiles, hasta obtener 96 L; se tamizó a través de un tamiz de 2 mm de diámetro (malla 10) de acero inoxidable en el Instituto de Investigación Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal (ICAMEX).



Figura 2. 22 Extendido del lodo (a), secado (b1) (b2), molienda (c) y tamizado (d)

2.5 Obtención del material vegetal

El material vegetal a estudiar es la *Hydrangea macrophylla L.* y se obtuvo del Vivero Regional No.2, Localidad Santa Ana, Tenancingo, a un costado del Centro Universitario Tenancingo (CUT) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), en el km 1 de la carretera Tenancingo- Ixtapan de la Sal S/N. Las plantas se eligieron de manera uniforme en cuanto a vigor, con una altura alrededor de 16 cm y un grosor de tallo de 4 mm.



Figura 2.23 Plantas de hortensia obtenidas del vivero Regional No. 2 de Santa Ana Tenancingo, Estado de México

2.6 Manejo agronómico

Las plantas de hortensia se mantuvieron bajo invernadero tipo delfín con plástico calibre 720, con intervalos de temperatura de 18 a 26 °C.



Figura 2.24 Invernaderos empleados para la experimentación

Las plantas se trasplantaron a raíz expuesta y se establecieron en macetas con capacidad de 1.6 litros realizándoles previamente un proceso de desinfección con un lavado de hipoclorito de sodio al 4.5%. Posteriormente se etiquetaron según el tratamiento. Luego de 8 días de estabilización después del trasplante se defoliaron y cortaron a una altura de 10 cm, con un mínimo de dos yemas. La separación entre macetas fue de 6 cm, regándolas de manera manual con 200 mililitros dos veces por semana.

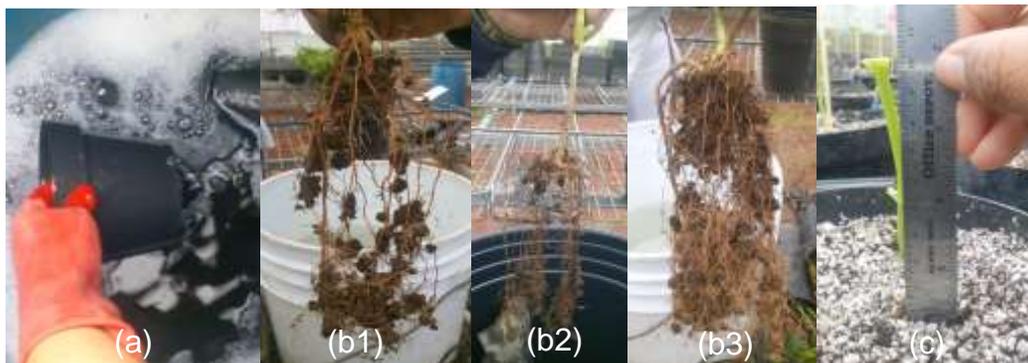


Figura 2.25 Desinfección de macetas (a), raíz de hortensia (b1, b2, b3) y corte de 10 cm de altura de las plantas (c)

2.7 Variables determinadas

2.7.1 Planta

Para determinar el efecto de la inclusión del lodo en la planta se evaluaron las siguientes variables morfológicas después de la defoliación a las plantas.

1. *Altura de la planta*: se realizó con una regla de metal de 15 cm marca office depot, la medida se tomó desde la base hasta el ápice floral, cada 5 días a partir de la primera medición.



Figura 2.26 Medición de altura de la planta de hortensia (*H. macrophylla*)

2. *Diámetro del tallo*: esto se midió con un vernier digital. Se propuso tomar la medición a la mitad de la planta, cada 5 días a partir de la primera medición.



Figura 2.27 Diámetro del tallo de las plantas de hortensia

3. *Vigorosidad aérea* (área foliar): Se midió con un flexómetro y se realizó una proyección longitudinal- trasversal, es decir, se hicieron dos mediciones en forma de cruz con ejes norte-sur y este- oeste, cada 5 días a partir de la primera medición.



Figura 2.28 Medición de área foliar en las plantas de hortensia (*H. macrophylla*) durante la experimentación

4. *Número de macollos y brote de yemas*: A los 80 días se revisaron las plantas por tratamiento y se contó el número de hijuelos y yemas.
5. *Contenido de clorofila*: Se determinó a los 60 días después de la defoliación de las plantas. La determinación se realizó a lo reportado por Küpper, *et al.* (2000). Se tomaron muestras al azar de 3 plantas por tratamiento, tomando 2 hojas intermedias, las plantas muestreadas por tratamiento fueron, (tabla 2.11) y figura 2.29, posteriormente se cortaron finamente las muestras (hojas) en tiras de 0.5 cm², se pesaron 0.5 g de muestra para macerarlo en un mortero adicionando 5 mL de solución de acetona al 80%, hasta extraer todo el colorante de la muestra, posteriormente se colocó la muestra en un tubo para centrifuga y se centrifugaron a 2000 rpm (revoluciones por minuto) por 10 minutos, se separó el sobrenadante que contiene los pigmentos, se ajustó cada tubo a 6mL con acetona al 80%, se toman 0.5 mL del sobrenadante de cada uno de los extractos y se diluye hasta 5 mL con acetona al 80%. Se midió en un espectrofotómetro UV-Vis Thermo scientific, modelo Genesys 10S Vis a longitudes de onda de 645 y 663 nm utilizando una muestra de acetona al 80% como blanco. Los análisis fueron realizados por duplicado.

Tabla 2.11 Relación del muestreo de hojas por planta para análisis de clorofila

Tratamiento	PLANTAS (2 hojas por plata)		
T0 (0% Iodo)	T0-30	T0-28	T0-23
T1 (10% Iodo)	T1-17	T1-12	T1-05
T2 (20% Iodo)	T2-23	T2-35	T2-20
T3 (30% Iodo)	T3-04	T3-17	T3-12
T4 (40% Iodo)	T4-36	T4-28	T4-11



Figura 2.29 Determinación de clorofila en plantas de hortensia en los diferentes tratamientos

Durante el experimento se tomaron fotografías a diferentes plantas y se identificaron posibles daños causados por el lodo. La descripción de síntomas se realizó cada 20 días.

2.7.2 Caracterización del lodo y sustratos

Antes de establecer el experimento se hizo un análisis del lodo deshidratado de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002 “*Lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*” en el Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental (LIIA) del Instituto Tecnológico de Toluca para determinar y comparar el contenido de metales pesados como arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc. Posteriormente el lodo se analizó en el laboratorio de suelos del Colegio de

Posgraduados (COLPOS) en Ciencias Agrícolas y en el laboratorio de suelos del Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria Acuícola y Forestal del Estado de México (ICAMEX) bajo las principales determinaciones analíticas de la NOM-021-SEMARNAT-2000 “*Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*”, los resultados obtenidos se compararon con el manual de “*Tablas para interpretar análisis de suelos*” (López, 2018) de ICAMEX.



Figura 2.30 Edificio de edafología y laboratorio de suelos del COLPOS

2.7.2.1 Parámetros de fertilidad

Se emplearon las siguientes determinaciones analíticas consideradas en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

AS-02 pH: Medido en agua. El equipo empleado fue un pH-metro, marca Thermo scientific, modelo Orion star A211.

AS-03 Densidad aparente, se empleó el método de la parafina, usando un terrón del lodo seco.



Figura 2.31 Determinación de densidad aparente del lodo de potabilización.

AS-07 Contenido de materia orgánica, se realizó bajo el método de Walkley y Black



Figura 2.32 Determinación de materia orgánica en el lodo al 100% y los tratamientos del 0 al 40%

AS-11 Fósforo extraíble, en suelos de ácidos a neutros por el valor de pH obtenido en lodo y tratamientos. Método de Bray y Kurtz 1. El equipo empleado fue un espectrofotómetro UV-Vis Thermo scientific, modelo Genesys 10S Vis.



Figura 2.33 Curva de calibración para la determinación de fósforo mediante el método de Bray y Kurtz 1.

AS-12 Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables (calcio, magnesio, sodio y potasio) con acetato de amonio.



Figura 2.34 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico en el lodo de potabilización.

AS-18 Medición de la conductividad eléctrica. El equipo empleado fue un conductímetro de mesa marca Conductronic, modelo CL 35.



Figura 2.35 Determinación de conductividad en el lodo y tratamientos

AS-19 Determinación de cationes solubles (calcio, magnesio, sodio y potasio) en el extracto de saturación por espectrofotometría de absorción atómica. El instrumento empleado fue el espectrofotómetro de Absorción Atómica, modelo Analyst 200, marca Perkin- Elmer. De llama aire- acetileno, cuenta con un atomizador y emplea como fuente de radiación una lámpara de cátodo hueco específica para cada metal analizado.



Figura 2.36 Espectrofotómetro de absorción atómica y lámpara de cátodo hueco para la determinación de cationes solubles en el lodo de potabilización.

AS-25 Determinación de nitrógeno total en el suelo mediante Kjeldahl.



Figura 2.37 Determinación de nitrógeno total en el lodo al 100% y tratamientos del 0 al 40%

AS-28 Determinación del tamaño de partículas elementales. Método de la pipeta.



Figura 2.38 Determinación de textura mediante el método de la pipeta en el lodo al 100% y tratamientos del 0 al 40%

2.7.2.2 Determinación de micronutrientes y metales contaminantes

AS-14 Contenido de micronutrientes disponibles (hierro, manganeso, zinc y cobre) y metales contaminantes (plomo, cadmio y níquel, aluminio). El instrumento empleado fue el espectrofotómetro de Absorción Atómica, marca Thermo Scientific, modelo ICE 3000 Series. Emplea como fuente de radiación una lámpara de cátodo hueco específica para cada metal analizado.



Figura 2.39 Determinación de metales totales en el lodo de potabilización

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización del lodo bajo la NOM-004-SEMARNAT

Los análisis realizados a los lodos de la presa de la planta potabilizadora dieron como resultado un contenido de humedad del 87% y tardaron en secarse 24 días. El lodo procedente de la planta potabilizadora se clasifica en tipo excelente, clase A de acuerdo a las especificaciones de metales en la Norma Oficial Mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2000, especificando su aprovechamiento para usos con contacto público directo durante su manipulación o aplicación por el bajo contenido de metales pesados como se observa en la tabla 3.12. Sin embargo, se presentó un incremento en los metales de cromo, cobre, plomo, níquel, zinc, aluminio y hierro a lo reportado por Espejel (2007) para un lodo de tarquina de la misma planta potabilizadora, indicando la existencia de una mínima fuente de contaminación en los cuerpos de agua o en los lugares donde se almacena el lodo.

Los valores obtenidos de los metales en el lodo también se compararon con las normas internacionales de Chile, España, Francia y Argentina de acuerdo a lo reportado por Paz *et al.* (2007) y en el caso de Torres (2017) en el Decreto 1287 del 10 de julio del 2014 en Bogotá, en el que dichas concentraciones dieron valores por debajo del límite máximo permisible, de acuerdo a los estándares establecidos por dichos países e indicando que el lodo es apto para su aprovecharlo como sustrato.

Para determinar si el aluminio es un constituyente que cause que el lodo es tóxico, se consultó en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993 que establece las características y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, pero no se encontró reportado el aluminio en los constituyentes inorgánicos de toxicidad.

Tabla 3.12 Análisis de metales de los límites máximos permisibles del lodo con base a la NOM-004-SEMARNAT-2002.

CONTAMINANTE	EXCELENTES	BUENOS	Espejel (2007)	LODO
mg kg ⁻¹ en base seca determinados de manera total				
Arsénico	41	75	1.30	ND
Cadmio	39	85	0.17	NQ
Cromo	1200	3000	2.86	36
Cobre	1500	4300	13.94	26
Plomo	300	840	16.06	32
Mercurio	17	57	0.46	*
Níquel	420	420	10.75	32
Zinc	2800	7500	192.32	201
Aluminio			88 392	126 822
Hierro			194.33	21 898

ND: No detectable, NQ: No cuantificable, * Sin determinar

En cuanto a los metales de As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni y Zn el lodo no presenta por el momento ningún riesgo de toxicidad en su manipulación y uso.

3.1 Parámetros de fertilidad del lodo

3.1.1 pH

El valor de pH obtenido del lodo (6.57) se encuentra clasificado moderadamente ácido a lo establecido por la NOM-021-SEMARNAT-2000. Panizza (2009) menciona que el Al³⁺ se encuentra disponible en la solución cuando los valores de pH son menores a 5.0, como se observa en la figura 1.9. Esto hace suponer que el Al³⁺ no se encuentra disuelto en la solución del suelo en los tratamientos (T1-T4) ni en lodo obtenido de la presa de lodos que se analizó, al obtener valores de pH que se ubican entre 6.69 a 7.03; por lo que no se obtendrá la variedad azul de hortensia a lo establecido con los requerimientos que menciona Mejía (2015), (tabla 3.13).

Tabla 3.13 Resultados de los parámetros de fertilidad de la muestra de lodo y tratamientos

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR DE REFERENCIA (Mejía, 2015)			TRATAMIENTOS				
		AZUL	ROSA	LODO	T0 (0%)	T1 (10%)	T2 (20%)	T3 (30%)	T4 (40%)
FERTILIDAD									
pH		4.5	6.0	6.57	7.00	7.03	6.86	6.75	6.69
Diagnóstico pH: Neutro 6.6-7.3		Ácido	Mod. Ácido	Mod. Ácido			Neutro		
TEXTURA									
Arena	%	20-45	20-45	0.0	87	67.3	72.2	72.5	69.1
Limo	%	28-40	28-40	58.9	9.5	19.5	17.9	17.7	23.9
Arcilla	%	15-52	15-52	41.1	3.5	13.2	9.9	9.7	7.1
Clase Textual		Franco- arcilloso		Arcillo- Limoso	Areno- Franco	Franco- Arenoso	Areno-Franco		Franco- Arenoso
Conductividad	dS m ⁻¹	0.5	1.0	1.449	*	0.26	0.74	0.87	1.183
Diagnóstico conductividad: Despreciable <1.0, muy ligero 1.1-2.0		Despreciable	Despreciable	Muy ligero	*	Despreciable de salinidad			Muy ligero

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR DE REFERENCIA (Mejía, 2015)			TRATAMIENTOS				
		AZUL	ROSA	LODO	T0 (0%)	T1 (10%)	T2 (20%)	T3 (30%)	T4 (40%)
Densidad aparente	g cm ⁻³			1.15			*		
Diagnóstico densidad: Arcilloso 1.0-1.19				Arcilloso			*		
Materia orgánica	%	5.0	10.0	8.32	34.65	31.43	23.41	20.51	15.68
Diagnóstico materia orgánica: Muy alta >6		Alto	Muy alto			Muy alto			
CIC	cmol kg ⁻¹	10	15	82.24			*		
Diagnóstico CIC		Baja	Media	Alta			*		

Diagnóstico: Los valores indicados están establecidos bajo la NOM-021-SEMARNAT-2000 y las tablas para interpretar análisis de suelos de ICAMEX (López, 2018), * Sin determinar

3.1.2 Clase textural

La textura arcillo limosa del lodo de la presa indica que es un suelo plástico y difícil de trabajar debido a su apelmazamiento y la gran cantidad de agua retenida entre sus partículas, la poca aireación que presenta entre otras características, que a pesar de tener una elevada cantidad de nutrientes y capacidad de intercambio catiónico como se aprecia en el estudio realizado por Vásquez y Vargas (2018) que emplearon lodo húmedo de una planta de tratamiento de aguas residuales para cultivo de zanahoria y lechuga; observando insectos, moscas, hongos y un olor fétido al inicio del crecimiento de la planta de zanahoria. A pesar de que la hortensia se adapta bien a diferentes tipos de suelos, prefiere los suelos franco-arcillosos como lo menciona Mejía (2015) y Osorio citado por Villanueva (2018), sin embargo, la obtención de clases texturales areno-francosas y franco-arenosas en los tratamientos (T0-T4) (tabla 3.13), producen suelos contrapuestos a los de la arcilla siendo muy ligeros presentando una excelente aireación, generando condiciones favorables al crecimiento y desarrollo de la raíz y por consiguiente a un buen desarrollo de la planta.

3.1.3 Conductividad eléctrica

Los valores menores de 1.0 dS m^{-1} que se obtuvieron en los T1, T2 y T3 son los requeridos para el buen desarrollo de la coloración azul y rosa como lo indica Mejía (2015) y Osorio citado por Villanueva, (2018). El tratamiento T4 y la muestra de lodo son muy ligeramente salinos, siendo aún tolerables para la variedad rosa (tabla 3.13), esto en referencia a lo que obtuvo Bautista (2009) quien determinó un buen crecimiento y desarrollo de hortensias con valores de conductividad eléctrica de 2.17 dS m^{-1} , sin embargo, al incrementar la concentración del lodo al 20 y 30% obtuvo conductividades de 4.52 dS m^{-1} y 4.36 dS m^{-1} , respectivamente, por lo que es importante vigilar este parámetro.

3.1.5 Materia orgánica

A pesar del elevado contenido de materia orgánica del lodo de la potabilizadora (8.32%) no satisface por si solo a la variedad rosa de la hortensia, pero si a la variedad azul de acuerdo a lo que menciona Mejía (2015) y Osorio citado por Villanueva, (2018) (tabla 3.13) sin embargo, los demás tratamientos (T0-T4) que presentan un contenido de materia orgánica mayor (15.68 %- 34.65%), satisfacen sin ningún problema a la variedad rosa. Paz et al., 2007; Panizza, 2009; Campos et al., 2009; Ruíz, 2011; Zambrano, 2012; Pérez, 2016; Torres, 2017; Rodríguez 2017 y Vásquez y Vargas, 2018 están de acuerdo que lo que más aportan los lodos es el contenido de materia orgánica en comparación con suelos no volcánicos con valores promedio de 1.6 a 3.0 %. Los lodos van a contrarrestar los efectos nocivos de salinidad e incrementar la actividad de los microorganismos nativos del suelo, lo que va a inducir a una correcta mineralización de los nutrientes que van a quedar disponibles a la planta. Además, el contenido de materia orgánica, mejoró algunas características físicas del suelo como la retención del agua, los riegos fueron más pesados, pero más espaciados como también lo indica Vásquez y Vargas (2018).

3.1.6 Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y densidad aparente

Se obtuvo un valor de 82.24 cmol kg⁻¹ en el lodo de potabilización indicando que tiene una gran cantidad de cargas negativa presentes en las fracciones granulométricas de la arcilla y de la materia orgánica, teniendo por lo tanto una capacidad de intercambio catiónico muy alta, se corroboró al obtener la densidad aparente de 1.15, (tabla 3.13) y clasificarse como un lodo arcilloso. Campos *et al.*, (2009); Utria *et al.*, (2009); Pérez (2016) garantizan que aportar lodos al suelo mejoran la capacidad de intercambio catiónico y un mayor contenido de elementos en la solución del suelo, que pueden ser absorbidos por la planta.

3.3 Análisis de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg)

Los tratamientos T1 al T4 y la muestra de lodo tienen buena concentración de N, K y Mg a los requerimientos de las variedades rosa y azul de la hortensia (tabla 3-14). Sin embargo, la concentración del Ca y P en los tratamientos T1 al T4 junto con la muestra de lodo son muy bajos en comparación con el T0 y a los requerimientos de las variedades rosa y azul y a Mejía (2015), (tabla 3.14) por lo que sería conveniente emplear más adelante la recomendación de Zambrano (2012) de tratar a los sustratos con enmiendas, como el yeso para incrementar los cationes y quede de esta manera disponible el fósforo.

Tabla 3.14 Resultados de fertilidad de los macronutrientes realizados a la muestra de lodo y tratamientos del 0 al 40%

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR DE REFERENCIA (Mejía, 2015)			TRATAMIENTOS				
		AZUL	ROSA	LODO	T0 (0%)	T1 (10%)	T2 (20%)	T3 (30%)	T4 (40%)
MACRONUTRIENTES									
Nitrógeno Total	%			0.65	0.96	0.90	0.70	0.78	0.70
Diagnóstico de N: muy alto >0.25						Muy alto			
Fósforo	mg kg ⁻¹			0.26	75.40	3.66	0.77	0.58	1.15
Diagnóstico de P: muy bajo <4				Muy bajo	Muy alto	Muy bajo			
Potasio	cmol kg ⁻¹	0.8	0.6	0.68	1.21	1.08	0.85	0.74	0.78
Diagnóstico K: Alto > 0.6		Alta	Media	Alto					
Calcio	cmol kg ⁻¹	6.0	11	0.17	28.51	4.69	2.32	0.73	1.23
Diagnóstico Ca: muy bajo < 2.0, alta > 10.0		Media	Alta	Muy bajo	Alto	Bajo		Muy bajo	
Magnesio	cmol kg ⁻¹	2.0	3.8	2.03	4.77	4.04	3.19	3.0	2.83
Diagnóstico Mg: Medio 1.3-3.0, Alto >3.0		Medio	Alto	Medio	Alto		Medio		
Sodio	cmol kg ⁻¹			0.54	0.18	0.14	0.31	0.49	0.37

Diagnóstico: Los valores indicados están establecidos bajo la NOM-021-SEMARNAT-2000 y las tablas para interpretar análisis de suelos de ICAMEX (López, 2018)

3.4 Análisis de micronutrientes (Cu, Fe, Mn y Zn) y metales contaminantes (Pb, Cd, Ni)

3.4.1 Micronutrientes de Cu, Fe, Mn y Zn

Los tratamientos T1 al T4 presentaron concentraciones muy elevadas de manganeso, zinc y hierro respecto a los requerimientos establecidos por mejía (2015) de las variedades de hortensia azul y rosa, tabla 3.15; el manganeso en exceso puede inducir a la deficiencia de hierro, debido a los efectos competitivos que se establecen entre ambos como lo menciona el ministerio de agricultura (2011), sin embargo, no se vio reflejada clorosis en las hojas de hortensia en los tratamientos T1 al T4. El tratamiento que más se acercó a los requerimientos para cualquiera de las dos variedades de la hortensia fue el T0, pero las plantas con 0% de lodo presentaron clorosis en las hojas durante la experimentación.

Tabla 3.15 Resultados de fertilidad de los micronutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu) del lodo y tratamientos.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR DE REFERENCIA (Mejía, 2015)			TRATAMIENTOS				
		AZUL	ROSA	LODO	T0 (0%)	T1 (10%)	T2 (20%)	T3 (30%)	T4 (40%)
MICRONUTRIENTES									
Manganeso	mg kg ⁻¹	10	10	404.33	20.81	310.97	373.31	385.07	389.95
Diagnóstico Mn: Mod. Bajo 5.1-12.0, muy alto >60		Mod. bajo	Mod. bajo	Muy alto	Medio			Muy alto	
Cobre	mg kg ⁻¹	5	5	1.48	0.93	0.99	0.5	0.34	0.23
Diagnóstico Cu: Muy alto > 3.5, medio 0.9-1.8		Muy alto	Muy alto		Medio			Bajo	
Zinc	mg kg ⁻¹	7	7	10.37	9.3	9.62	8.65	9.26	9.12
Diagnóstico Zn: Mod. Alto 6.0-8.0, muy alto >9.5		Mod. Alto	Mod. Alto	Muy alto	Alto	Muy alto		Alto	
Hierro	mg kg ⁻¹	100	50	207.64	159.76	211.72	201.05	195.67	191.23
Diagnóstico Fe: Muy alto >49		Muy alto	Muy alto				Muy alto		

Diagnóstico: Los valores indicados están en las tablas para interpretar análisis de suelos de ICAMEX (López, 2018). Mod: moderadamente

3.4.2 Metales contaminantes Pb, Cd, Ni

En la determinación de metales contaminantes del lodo y los sustratos se obtuvo que ninguno excede los parámetros de toxicidad tabla 3.16 a lo establecido a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Tabla 3.16 Contenido de metales contaminantes (Pb, Cd, Ni) en muestras de lodo y tratamientos del 0 al 40%.

PARÁMETRO	UNIDAD	TRATAMIENTOS						
		LODO	T0 (0%)	T1 (10%)	T2 (20%)	T3 (30%)	T4 (40%)	
METALES PESADOS								
Níquel	mg kg ⁻¹	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	
Diagnóstico Ni		No tóxico						
Tóxico: 100 mg kg ⁻¹								
Cadmio	mg kg ⁻¹	NQ	0.04	NQ	NQ	0.06	NQ	
Diagnóstico Cd		No tóxico						
Tóxico: 3-5 mg kg ⁻¹								
Cromo	mg kg ⁻¹	0.05	NQ	0.14	NQ	NQ	NQ	
Diagnóstico Cr		No tóxico						
Tóxico: 5 mg kg ⁻¹								
Plomo	mg kg ⁻¹	4.96	1.75	2.0	NQ	3.79	1.81	
Diagnóstico Pb		No tóxico						
Tóxico: 100-300 mg kg ⁻¹								

3.5 Variables botánicas y fisiológicas

3.5.1 Altura de la plata

No se observó crecimiento en el tallo principal después de la defoliación por lo que el análisis se realizó mediante la altura de las yemas localizadas cerca de la punta del tallo. De acuerdo al resultado obtenido Anova (tabla 3.17), se aprecia que la altura de la planta se ve afectada significativamente por los tratamientos. Caso contrario a los bloques, en donde no se observa que la altura tenga un efecto del bloque.

Tabla 3.17 Análisis de varianza (Anova) para la altura de la planta al 5 % de nivel de significancia

Fuente	GL	SC	MC	F	P	F_{0.95}
Tratamiento	4	7.7676	1.9419	6.78	0.001	2.866
Bloque	5	3.3513	0.6703	2.34	0.079	2.711
Error	20	5.7271	0.2864			
Total	29	16.8460				

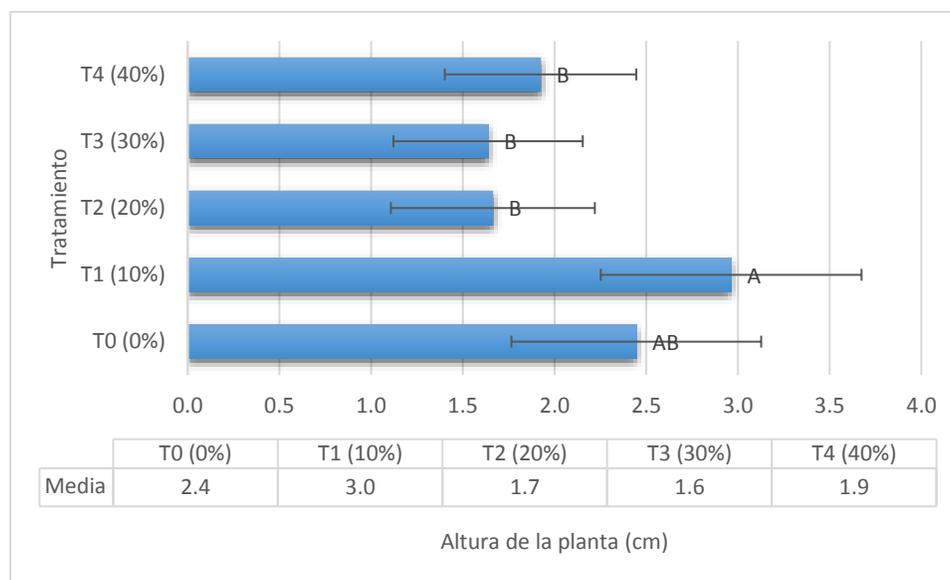
En la prueba de Tukey se obtuvo que la mayor altura se presentó en las plantas de hortensia donde se aplicó el 10 % de lodo, 45 % de perlita y 45% de peat moss (T1), obteniendo una media de 3.0 cm, seguido del tratamiento T0, el cual tampoco presento diferencias estadísticas con los tratamientos de T2, T3 y T4 que se les considero en el agrupamiento (B).

Tabla 3.18 Comparación de medias (Tukey, 0.05) para altura de la planta de hortensia (*Hydrangea macrophylla*)

Tratamiento	Perlita %	Lodo %	Turba %	Media (cm)	
T1	45	10	45	3.0 ± 0.711	A
T0	50	0	50	2.4 ± 0.681	AB
T4	30	40	30	1.9 ± 0.522	B
T2	40	20	40	1.7 ± 0.556	B
T3	35	30	35	1.6 ± 0.516	B

Medias con distintas letras en la columna son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$)

En la figura 3.40 se muestra la altura de la planta respecto a las diferentes concentraciones de lodo. El tratamiento con 10% de lodo presentó mayor altura respecto a los demás. Esto coincide con lo reportado por Ruíz (2011), donde la mejor altura se presentó al utilizar concentraciones altas de lodo, en plantas de maíz (*Zea mays*) y brócoli (*Brassica oleracea*) empleando 6 kg m⁻² de lodos de potabilización + 50% de fertilizante químico (Nitrofoska azul). Otro caso es el de González *et al.* (2017) que mejoraron las propiedades químicas del suelo en maíz (*Zea mays*) en invernadero con el uso de biosólidos urbanos con dosis de 400 t ha⁻¹ y 500 para un apropiado desarrollo de la planta. De igual forma Torres (2009) reporta que las aplicaciones del lodo industrial textil favorecen el incremento de la longitud del tallo en plantas de Lilis (*Lilium sp*) con el tratamiento del 2% de lodo.



Medias con distintas letras son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$)

Figura 3.40 Comparación con medias (Tukey, 0.05) para altura de la planta de hortensia (*Hydrangea macrophylla*) con las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35% turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).

3.5.2 Diámetro del tallo de las plantas

En el caso del diámetro, el análisis de varianza nos muestra de manera específica como no existe diferencia estadística entre los tratamientos (tabla 3.19). Pero si se ve afectado de manera significativa en los bloques, realizando la prueba de Tukey.

Tabla 3.19 Análisis de varianza (Anova) para el diámetro de la planta al 5 % de nivel de significancia

Fuente	GL	SC	MC	F	P	F _{0.95}
Tratamiento	4	0.0749	0.0187	0.41	0.800	2.866
Bloque	5	2.7026	0.5405	11.81	0.000	2.711
Error	20	0.9150	0.0457			

Total	29	3.6925
--------------	----	--------

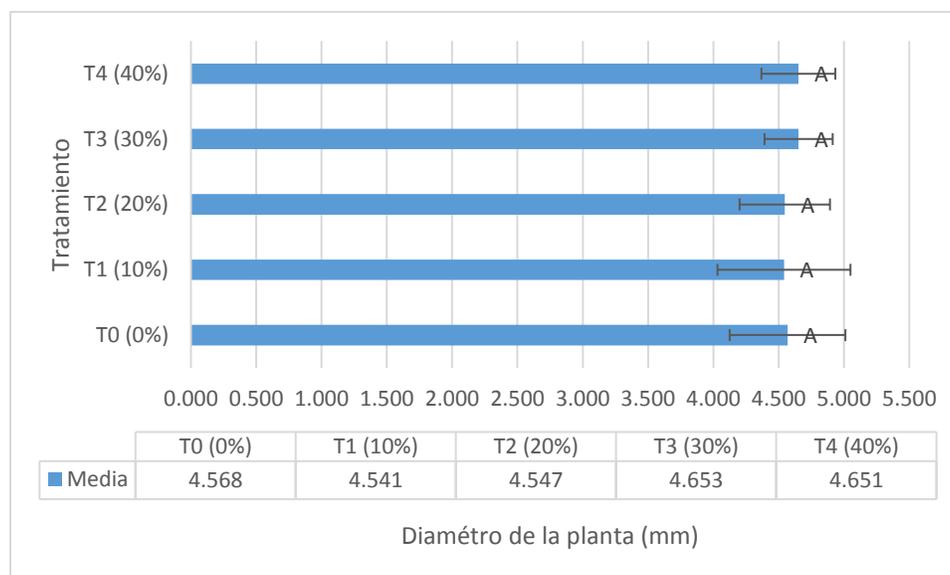
En la prueba de Tukey (tabla 3.20), se observa que en el bloque 6 se registró la menor medida del diámetro (3.964 mm) y esta fue diferente significativamente del resto de los bloques. Esto se atribuye a la posición del bloque ya que se tenía menos intensidad de luz en el invernadero por la presencia de árboles exteriores.

Tabla 3.20 Prueba de Tukey para el diámetro en el tallo de la planta de hortensia (*Hydrangea macrophylla*) en los bloques

Bloque	Media (mm)	Agrupamiento
3	4.823± 0.233	A
5	4.777± 0.081	A
1	4.764± 0.157	A
2	4.732± 0.257	A
4	4.493± 0.256	A
6	3.964± 0.175	B

Medias con distintas letras son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$)

En la figura 3.41 se aprecia la relación entre el diámetro del tallo con las diferentes concentraciones de lodo el cual no se ve afectado de manera significativa con alguno de los tratamientos; como le sucedió a González *et al.* (2017) que encontraron que no existieron diferencias estadísticas entre los tratamientos de las variables vegetativas (altura de la planta, diámetro basal del tallo, número de hojas, área foliar por planta) de maíz (*Zea mays*) en invernadero al aplicar concentraciones de un biosólido desde las 100 t ha⁻¹ a las 500 t ha⁻¹. Caso contrario a lo reportado por Ruíz (2011) que encontró una variabilidad estadística en el calibre del brócoli al aplicar 9 kg m² de lodo de potabilización y al aplicar 6 kg m² de lodo en maíz.



Medias con distintas letras son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$)

Figura 3.41 Comparación con medias (Tukey, 0.05) para diámetro (mm) de la planta de hortensia (*Hydrangea macrophylla*) con las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35% turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).

3.5.3 Área foliar

En el área foliar se encontró que el tratamiento influyó de manera significativa. En el caso de los bloques, estos no afectaron de manera significativa el área foliar como se observa en el Anova.

Tabla 3.21 Análisis de varianza (Anova) para la altura de la planta al 5 % de nivel de significancia

Fuente	GL	SC	MC	F	P	F _{0.95}
Tratamiento	4	125.894	31.474	8.08	0.000	2.866
Bloque	5	48.459	9.692	2.49	0.066	2.711
Error	20	77.857	3.893			
Total	29	252.211				

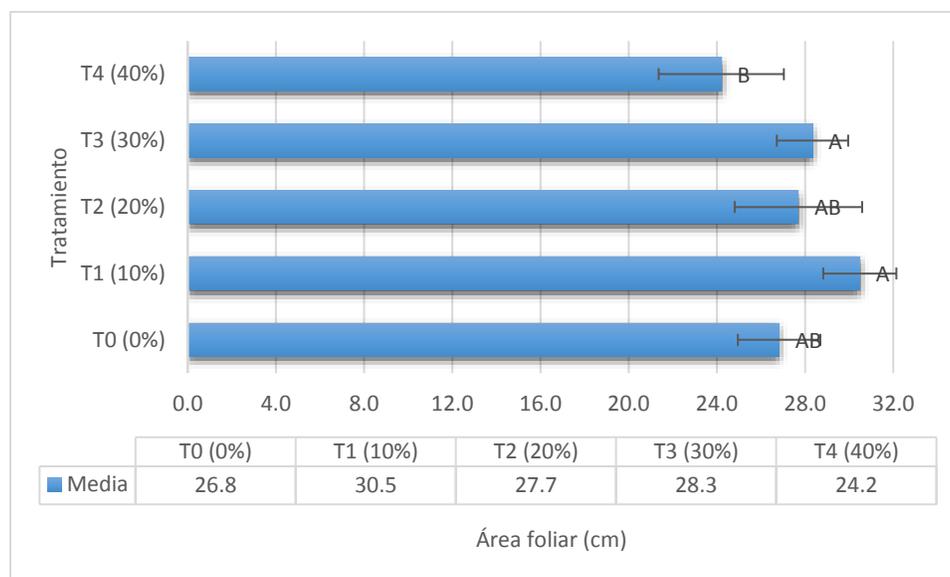
Al comparar los valores promedio del área foliar (Tukey, $\alpha \leq 0.05\%$) (tabla 3.22) el tratamiento que presentó mayor área foliar fue al que se le aplicó el 10 % de lodo (T1) con una media de área foliar de 30.5 cm, este tratamiento no tuvo diferencias significativas con el T0, T2 y T3. El tratamiento T4, es el que presentó la menor área foliar con respecto a los demás tratamientos y no tuvo diferencia significativa con los tratamientos T0 y T2, correspondiéndoles el agrupamiento (B).

Tabla 3.22 Comparación de medias (Tukey, 0.05) para el área foliar de la planta de hortensia (*Hydrangea macrophylla*)

Tratamiento	Perlita %	Lodo %	Turba %	Media (cm)	
T1	45	10	45	30.5± 1.66	A
T3	50	0	50	28.3± 1.62	A
T2	30	40	30	27.7± 2.89	AB
T0	40	20	40	26.8± 1.87	AB
T4	35	30	35	24.2± 2.84	B

Medias con distintas letras son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$)

En la figura 3.42 se observa que el tratamiento del 10% de lodo, 45 % de perlita y 45 % de peat moss (T1) presentó mayor área foliar (30.5 cm) con respecto a los demás tratamientos. Utria *et al.*, (2009) obtuvieron una buena superficie foliar en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) cuando aplicaron 135 g lodo kg⁻¹ de depuradora en un suelo ferralítico rojo compactado.



Medias con distintas letras son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$)

Figura 3.42 Comparación con medias (Tukey, 0.05) para área foliar de la planta (cm) de la planta de hortensia (*Hydrangea macrophylla*) con las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35% turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).

3.5.4 Número yemas o brotes.

El análisis de varianza muestra como no existe diferencia estadística por efecto de los tratamientos (tabla 3.23) pero si se observa un efecto en los bloques de manera significativa.

Tabla 3.23 Análisis de varianza (Anova) para el número de brotes (yemas) de la planta al 5 % de nivel de significancia

Fuente	GL	SC	MC	F	P	F_{0.95}
Tratamiento	4	2.0380	0.5095	1.21	0.339	2.866
Bloque	5	11.9273	2.3855	5.65	0.002	2.711
Error	20	8.4420	0.4221			
Total	29	22.4073				

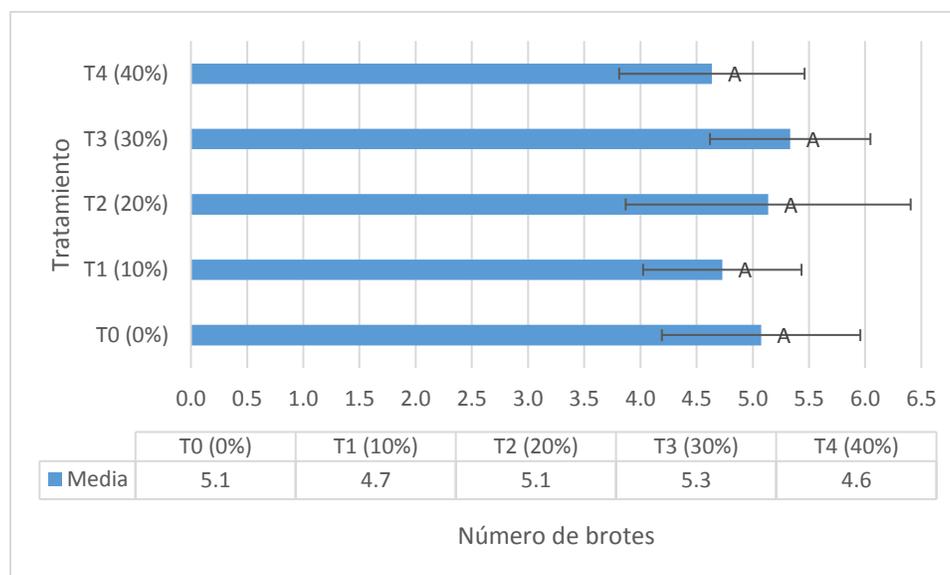
En la prueba de Tukey (tabla 3.24) el bloque que tuvo mayor cantidad de brotes (yemas) fue el bloque 3, el bloque que tuvo la menor cantidad de brotes (yemas) fue el 6 con una media de 3.6 el cual tuvo una diferencia significativa con los demás tratamientos.

Tabla 3.24 Prueba de Tukey para el número de brotes (yemas) en la planta en los bloques

Bloque	Media (mm)	Agrupamiento
3	5.6± 0.792	A
1	5.3± 0.801	A
2	5.2± 0.596	A
4	5.1± 0.649	A
5	5.1± 0.577	A
6	3.6± 0.492	B

Medias con distintas letras son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$)

En la figura 3.42 se muestra que el número de brotes no se vio afectado de manera significativamente por los tratamientos empleados.



Medias con distintas letras son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$)

Figura 3.43 Comparación con medias (Tukey, 0.05) para número de brotes (yemas) de la planta de hortensia (*Hydrangea macrophylla*) con las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35% turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).

El mayor número de brotes del bloque 3 se le atribuye a la intensidad de luz en el invernadero ya que existían árboles en el exterior de él.

3.5.4 Número de macollos o hijuelos

El análisis de varianza muestra que existen diferencias significativas en el número de macollos entre los tratamientos (tabla 3.25), en el caso de los bloques se encontró que estos no afectaron de manera significativa en el número de macollos en las plantas de hortensias.

Tabla 3.25 Análisis de varianza (Anova) para el número de macollos o hijuelos de la hortensia al 5 % de nivel de significancia

Fuente	GL	SC	MC	F	P	F_{0.95}
Tratamiento	4	1.800	0.4500	5.0	0.006	2.866
Bloque	5	1.200	0.2400	2.67	0.053	2.711
Error	20	1.800	0.0900			
Total	29	4.800				

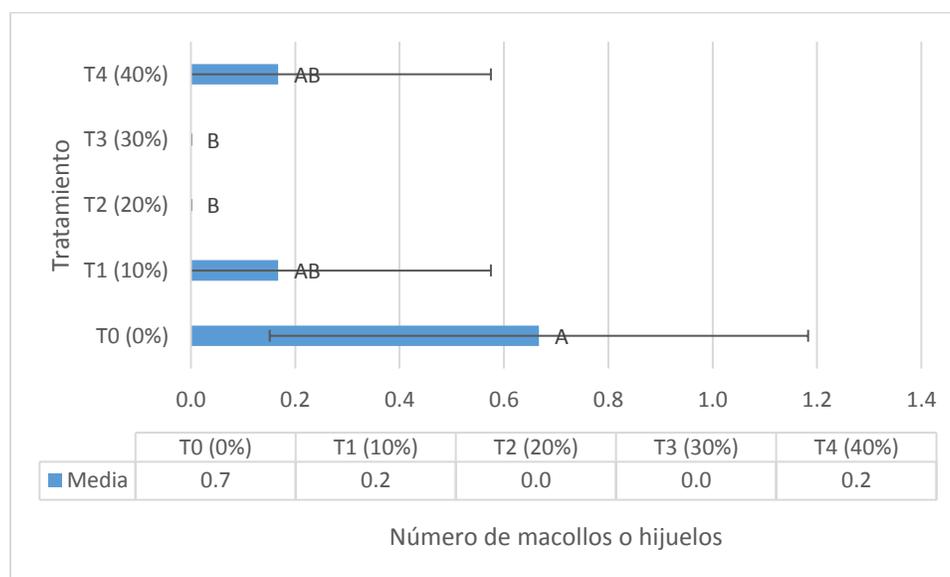
En la prueba de Tukey (tabla 3.26) el tratamiento T0 fue el que presentó mayor cantidad de macollos o hijuelos con una media de 0.7. Los tratamientos T4 y T1 no difieren el nivel de significancia con el T0 y T3 y T2, agrupándolos en (AB). Los del 20 y 30 % de lodo (T2 y T3) no presentaron ningún macollo o hijuelo por lo que no afectaron de manera significativa en comparación con los demás tratamientos, agrupándolos en (B). Gonzalo (2017) menciona que los hijuelos son importantes ya que de ellos derivara la nueva planta de calidad comercial.

Tabla 3.26 Comparación de medias (Tukey, 0.05) para el número de macollos o hijuelos de la planta de hortensia (*Hydrangea macrophylla*)

Tratamiento	Perlita	Lodo	Turba	Media (cm)	
	%	%	%		
T0	45	10	45	0.7± 0.52	A
T4	50	0	50	0.2± 0.41	AB
T1	30	40	30	0.2± 0.41	AB
T3	40	20	40	0.0± 0.0	B
T2	35	30	35	0.0± 0.0	B

Medias con distintas letras son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$)

En este caso el tratamiento que presentó mejor respuesta fue el tratamiento T0, con 0 % de lodo, 50 % de perlita y 50 % de peat moss, como se muestra en la figura 3.44.



Medias con distintas letras son diferentes estadísticamente (Tukey $P \leq 0.05$)

Figura 3.44 Comparación con medias (Tukey, 0.05) para número de macollos o hijuelos de la planta de hortensia (*Hydrangea macrophylla*) con las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35% turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).

3.6 Contenido de clorofila

La inclusión del lodo de potabilización en diferentes concentraciones causó cambios en la concentración de clorofila como se observa en la siguiente tabla 3.27. El contenido de clorofila es un indicador de la actividad fotosintética de las plantas y está relacionado con el contenido de nutrientes y las condiciones medio ambientales de luz y temperatura (Bautista *et al.*, 2015). El experimento se realizó en invernadero donde las condiciones de temperatura, radiación y humedad no fueron las mismas para todos los tratamientos (ver figura 3.44). Lo anterior sugiere

que el contenido de clorofila en las plantas, estuvo relacionado a la concentración de nutrimentos del lodo ya que se vio reflejada de manera significativa para los tratamientos del T1 y T4, el testigo (T0) dio el valor medio más bajo con 7.421 mg kg⁻¹, los datos obtenidos del contenido de clorofila en las plantas de hortensia fueron más altos que los obtenidos por Bautista, (2015) en hortensias cultivadas con un lodo textil.

Tabla 3.27 Media y desviación estándar del contenido de clorofila en hojas de hortensia cultivadas en perlita, turba y lodo a diferentes concentraciones. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35% turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).

Tratamiento	µg g ⁻¹ ó mg kg ⁻¹		
	Clorofila A	Clorofila B	Clorofila TOTAL
T0	4.643 ± 0.26 e	2.780 ± 0.22 d	7.421 ± 0.20 d
T1	6.960 ± 0.23 a	4.052 ± 0.22 a	11.009 ± 0.20 a
T2	5.161 ± 0.20 d	3.028 ± 0.22 b	8.186 ± 0.20 b
T3	5.171 ± 0.25 c	2.936 ± 0.22 c	8.105 ± 0.20 c
T4	6.936 ± 0.31 b	4.053 ± 0.26 a	10.986 ± 0.23 a

Medias con distintas letras son diferentes estadísticamente (Tukey P≤0.05)



Figura 3.45 Comparación visual del T0 y T4 en el contenido de clorofila

3.7 Descripción de síntomas visuales y color de las inflorescencias

En la siguiente tabla se muestra el desarrollo que se obtuvo de las plantas de hortensia con los diferentes tratamientos del T0 al T4, observándose que el T1 es que tuvo mejor respuesta con la inclusión del lodo.

Tratamiento	14-JUN-2019	26-JUN-2019	09-JUL-2019	06-AGO-2019	09-sep-2019
T0 (0%): (A-48)					
T1 (10%): (B-08)					



Al término de la experimentación 126 de las 240 plantas alcanzaron la inflorescencia como se muestra en la figura 3.46. Se puede observar una disminución de la variedad rosa al ir incrementando la concentración de lodo en los tratamientos. El T1 tuvo la mayor cantidad de inflorescencias de color morado, indicando que no se ha llevado completamente la acidificación. El tratamiento T2 obtuvo la mayor variedad de color azul, seguida del T4, T3 y por último el T1, esto nos indica que en el T2 se presenta una acidificación del sustrato pudiendo estar presente el aluminio intercambiable para la planta. Si se toma en cuenta los tratamientos con incorporación de lodo de las 103 plantas con inflorescencia el 50.5% son azules y tan solo el 7.7% rosas, el resto 41.8% son moradas que indican una transición hacia el color azul, por lo que la adición del lodo tiene bastante influencia en el cambio de la coloración de las brácteas o sépalos. Contrario al tratamiento testigo en donde las inflorescencias que prevalecen son las brácteas de color rosa con un 69.5% y el 0% de azules.

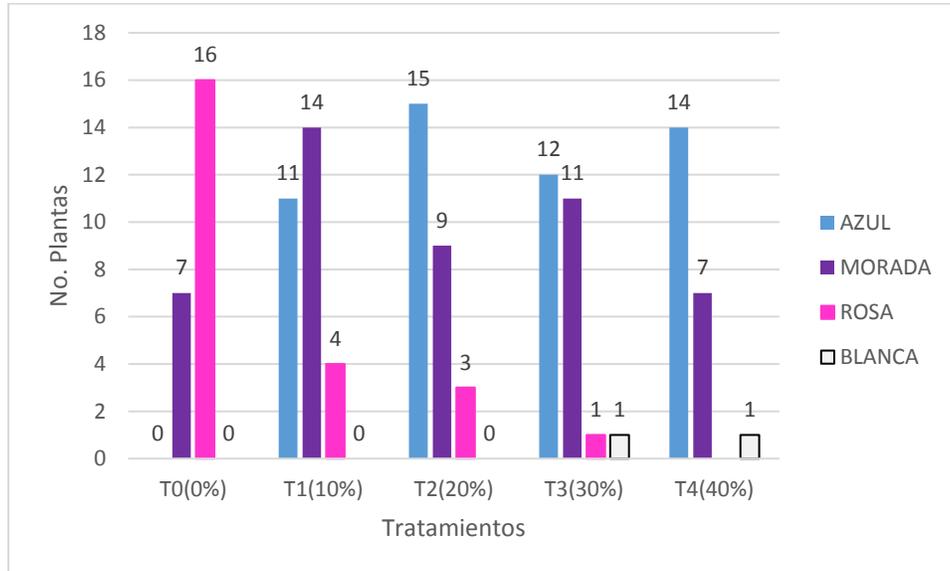


Figura 3.46 Número y tipo de Inflorescencias de acuerdo a las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35% turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).

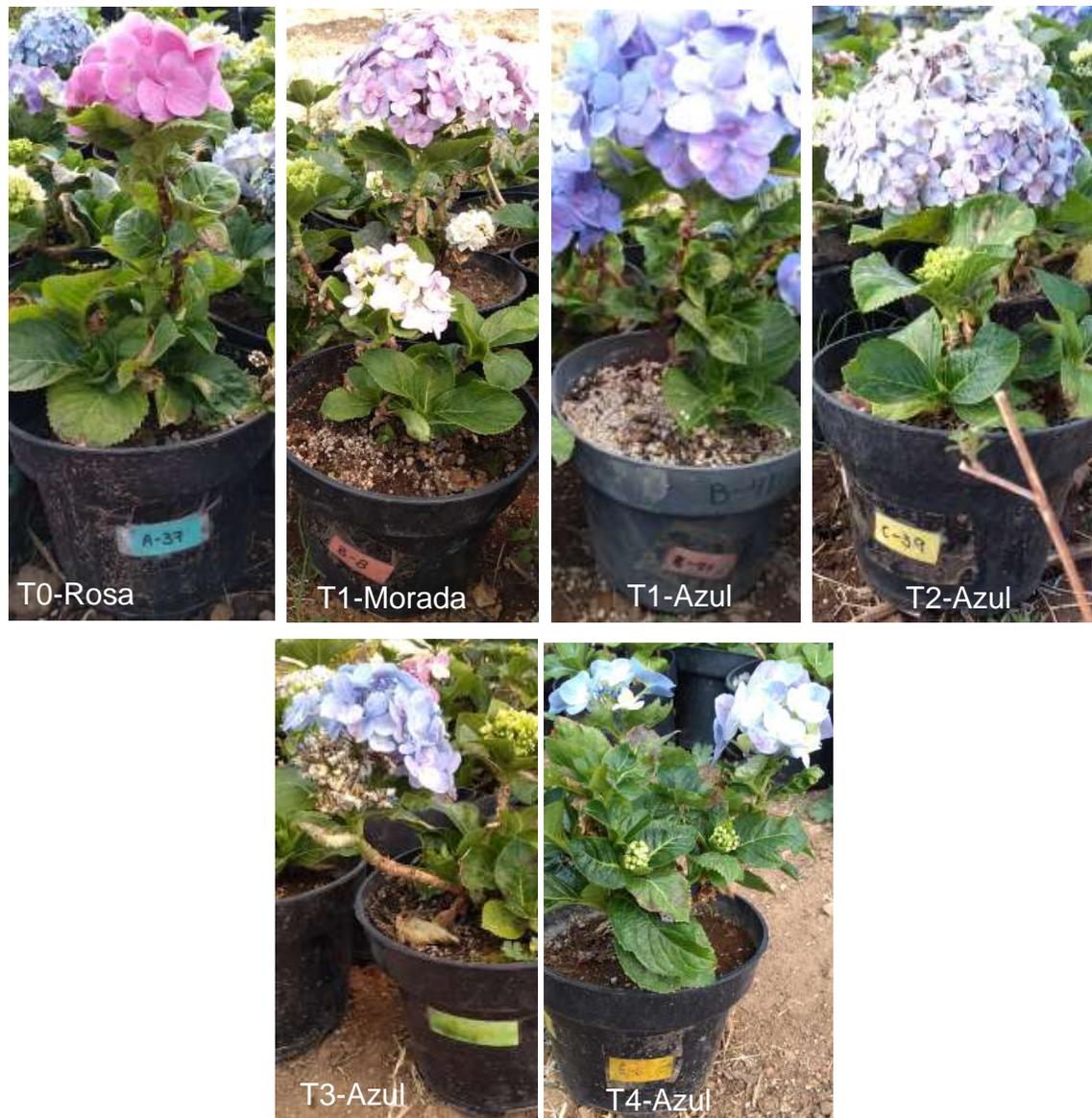


Figura 3.47 Diferentes Inflorescencias de acuerdo a las diferentes concentraciones de lodo. T0(0% lodo, 50% perlita, 50% turba), T1(10% lodo, 45% perlita, 45% turba), T2(20% lodo, 40% perlita, 40% turba), T3(30% lodo, 35% perlita, 35% turba), T4(40% lodo, 30% perlita, 30% turba).

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con el objetivo general de evaluar el lodo generado de un proceso de potabilización para su aplicación como sustrato en la planta ornamental *Hydrangea macrophylla* L. en maceta, considerando la hipótesis de si es un buen mejorador orgánico del suelo para el adecuado desarrollo de la hortensia, las conclusiones derivadas de esta investigación, son las siguientes:

Se concluye que la evaluación del lodo de la planta potabilizadora puede ser aprovechado para usos urbanos con contacto público directo como lo indica la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002) dado que su concentración está muy por debajo del límite máximo permisible en metales, al obtener una clasificación A en la muestra del lodo.

El análisis estadístico muestra de acuerdo a las variables de respuesta determinadas (altura, diámetro, área foliar, brotes y número de macollos) en el experimento que el uso del lodo de potabilización es un mejorador orgánico para la producción de hortensias en maceta y emplearse como sustrato en una concentración de 10% de lodo con 45% de perlita y 45% de peat moss (T1) donde se observaron los mejores resultados; comparado con los tratamientos T2, T3 y T4 donde el desarrollo fue menor. A pesar de que los resultados de macro y micronutrientes del T0 fueron los más favorables para las variedades azul y rosa de la hortensia, éste no se vio reflejado en el buen desarrollo y crecimiento debido a la textura que se obtuvo con un 87% de arena, 9.5% de limo y 3.5% de arcilla por la poca retención de nutrientes y la pérdida de ellos en los riegos realizados apreciándose también dicha pérdida en el contenido de clorofila que se obtuvo en el T0.

Es recomendable realizar más estudios empleando otro tipo de sustrato como turbia rubia que presenta un pH de 3.5 a 4 y así poder evaluar el contenido de aluminio en condiciones acidas y determinar si se puede obtener una pronta respuesta de la

coloración azul de las brácteas, aplicando las enmiendas correctas de calcio y fósforo.

Los altos contenidos de manganeso y la baja concentración de calcio y fósforo en los tratamientos del T1 al T4 no permitieron llegar a la floración en todas las plantas en el tiempo establecido de la experimentación, para el caso del aluminio (Al^{3+}) se observa que de acuerdo a los porcentajes obtenidos tiene influencia en los tratamientos T1 a T4.

Se recomienda realizar análisis microbiológicos al lodo de potabilización para determinar si su aplicación puede ser directa o se le necesita realizar compostaje para cumplir con lo establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002.

6 FUENTES CONSULTADAS

- Adler E. (2002). “*Gestion des boues d`eau potable á la recherche des bonnes pratiques*”. Synthèse du groupe “*terres de decantation*”. AGHTM. France.
- Aldana Tique Angie Julieth y Pérez Rojas Ricardo Andrés. (2017) “*Propuesta para el tratamiento y aprovechamiento de lodos en una PTAP Convencional. Caso de estudio: Planta de tratamiento de agua potable del espinal-Tolima*” Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería. Bogotá.
- Alegría Muñoz Waldemar (2016). “*Texto básico para profesional en ingeniería forestal, en el área de fisiología vegetal*”. Departamento de Ecología y Conservación, Facultad de Ciencias Forestales. Ciudad de Iquitos, Loreto-Perú.
- Alvarado Soraya. (2000). “*Metodologías de análisis físico químico de suelo, aguas y foliares*”. *Tercera Aproximación*. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. Laboratorio del Departamento de Manejo de Suelos y aguas. Quito – Ecuador.
- Ansorena y Miner J. (1994). “*Sustratos: Propiedades y caracterización*”. Ediciones Mundi-Prensa. Pág 172. Madrid, España.
- Andrades Marisol y Martínez María Elena. (2014). “*Fertilidad del suelo y parámetros que la definen*”, 3ª Edición. Universidad de la Rioja.
- Arango M. (2003). “*Hydrangea hortensia*”. Ed. Hortitecnia Ltda. p 7-8; 21-24.
- Arévalo de Gauggel Gloria, Castellano Moises (2009). “*Manual Fertilizantes y Enmiendas*”. Agrícola Panamericana, El Zamorano, Honduras.

- Bailey D.A., (1992). "Hydrangeas", In: R.A. Larson (ed.). Introduction to Floriculture, Second Edition. p. 365-383. Academic Press. San Diego, California.
- Bailey D.A., (1989). "*Hydrangea Production*". 3er v. Timber Press, Inc. p 30.
- Ballester F.J., (1997). "*Forzado de Floración en Hortensia*". Horticultura. p 119, 13-18. Sebastià, S.C
- Cabrera R.I., (1998). "*Propiedades y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta*". Revista Chapingo Serie Horticultura 5(1). p 5-11. New Jersey. U.S.A.
- Cabrera, R.I. (1995). "*Fundamentals of container media management*". Part. 1. Physical properties. Rutgers Cooperative Extension Factsheet No. 950. p.4
- Carreño Andrea, Chaparro Giraldo Alejandro (2013). "Tolerancia al aluminio en especies vegetales: mecanismos y genes". Pontificia Universidad Javeriana, Universitas Scientiarum, vol.18, núm.13, pp. 283-310. Bogotá, Colombia.
- Castañeda Sarabia Onia. (2003). "*Determinación de la toxicidad de los lodos generados por una planta potabilizadora, utilizando bioensayos*" Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). p. 1-15. México D.F.
- Cerón Oswaldo, Millán Sandra, Espejel Fabricio, Rodríguez Arturo, Ramírez Rosa María. (2007). "*Aplicación de Lodos de Plantas Potabilizadoras para Elaborar Materiales de construcción*". Instituto de Ingeniería UNAM. p. 1-11. México D.F.

- Comisión Nacional del Agua. (2007a). “*Guía para el manejo, estabilización y disposición de lodos químicos*”. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. p 1-114. México
- Comisión Nacional del Agua. (2007b). “*Diseño de plantas potabilizadoras, tipo de tecnología simplificada*”. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. p. 3-259. México
- Comisión Nacional del Agua. (2012). “*Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*”. p. 1-274. Ciudad de México.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). “*Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*”. p. 1-274. Ciudad de México.
- CONAGUA. “*Evaluación rápida de plantas potabilizadoras*”
http://mapasconagua.net/previ_max.aspx?nm=SGAPDS-1-15-Libro45.pdf&pg= última fecha de consulta: 12-Oct-2017
- Dayton E.A., Basta N.T. (2001). “*Characterization of Drinking Water Treatment Residuals for use as a Soil Substitute*”. Water Environment Research. Vol. 73. No. 1. p 52-57. Oklahoma. E.U.A.
- Díaz Ibarra , M.A., Muy Rangel M.D., Rubio Carrasco W., Armendáriz Alcaraz O. (2010). “*Aplicación de lodos de procesos de potabilización como mitigantes de sodicidad en suelos agrícolas*” Ingeniería. Vol. 14. Núm. 2. p. 87-97. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, México.
- Díaz R., Hunter R.A. “*Metodología de muestreos de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero*”.

<https://books.google.com.mx/books?id=dsYOAQAAIAAJ&pg=PA19&lpg=PA19&dq=superfloc+127&source=bl&ots=Xy5C-bAmQr&sig=67Q6kxpxq4alzjbhmb9JJwV7I8MU&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj437-qvs7YAhWn5IMKHeIVBvwQ6AEILjAB#v=onepage&q=superfloc%20127&f=false>. Última fecha de consulta: 03-Enero-2018

- Espejel Ayala F., Schouwenaars R., Rojas Valencia M.N., Ramírez Zamora R.M. (2011). “*Valorización de residuos generados en plantas potabilizadoras en el proceso de producción de Zeolitas de intercambio iónico para el tratamiento de agua*”. Instituto de ingeniería, UNAM. p. 1-9. México D.F.
- Espejel Ayala Fabricio. (2007). “*Valoración de lodos generados en plantas potabilizadoras para elaborar productos cerámicos*”. Instituto de Ingeniería UNAM. México D.F.
- González G. A, Téllez (2014). “*Nutricion de cultivos*”. Mundi- Prensa México. Colegio de Posgrados.
- H. Kupper, M. Spiller, and F.C. Kupper. “*Photometric method for the quantification of chlorophylls and their derivatives in complex mixtures: fitting with Gauss-peak spectra*”. Anal Biochem., 2000, Vol. 286, pp. 247-256.
- Husillos Rodríguez Nuria. (2012). “*Valorización de residuos de estaciones de tratamiento de agua potable y residual en la industria del cemento*”. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Madrid
- Husillos R. N., Martínez R. S., Blanco V. M.T., Guillem M., Puig L. J. E., Flores (2010). “*Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludges: characterization and technological behavior of cement mortars with atomized sludge*”. Cement and Concrete pag. 778-786.

- IFA (Asociación Internacional de la Industria de los fertilizantes). (2002) “*Los fertilizantes y su uso*” Página Web: <http://www.fao.org/3/a-x4781s.pdf>. Última Fecha de consulta 14-Sep-2018.
- IFOAM. Manual de Capacitación en Agricultura Orgánica para los Trópicos. (2009). “*Nutrición de las plantas*”. https://www.ifoam.bio/sites/default/files/basic_spanish_final.pdf. Última fecha de consulta: 25-Oct-2017
- Infoagro. (2017).” Tipos de sustratos de cultivos”. <https://mexico.infoagro.com/tipos-de-sustratos-de-cultivo/>. Última fecha de consulta: 20-12-19
- Infoagro. (2019).” Tipos de sustratos de cultivo (1° parte)”. https://www.infoagro.com/industria_auxiliar/tipo_sustratos.htm. Última fecha de consulta: 20-12-19
- Instituto de la Potasa y el Fósforo (2014)., “Manual internacional de fertilidad de suelos” AC INPOFOS.
- ITIS, I.T. (2012) “*Catalogue of life*”. <http://www.catalogueoflife.org/col/details/species/id/7055669>. Última fecha de consulta: 04- Dic-2017
- Juan Gonzalo Ángel (2017) “Como cultivar de forma correcta las hortensias” <https://www.youtube.com/watch?v=A6bRqvtJOzw&t=667s>. Última fecha de consulta: 17-May-2020
- Kim, J. G., Lee, S. S., Moon, H.-S., & Kang, I. M. (2002). *Land application of alum sludge from water purification plant to acid mineral soil treated with acidic water. Soil Science and Plant Nutrition, 48(1), 15-22.*

- Limón Macías Juan Gualberto (2019). “Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?”. Guadalajara Jalisco. http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf. Última fecha de consulta: 09-Dic-2019.
- López Pineda Sara Catalina, González Cardona Francisco. (2017). “Estudio de prefactibilidad para la creación de una empresa dedicada a la producción de flores tipo *hydrangea* sp. (hortensias), en el oriente Ontioqueño”. Especializaciónn en gerencia de proyectos. Escuela superior de mercadeo, Esumer.
- López Ponce Yoseline Mariana. (2018). “Logística de exportación de hortensias para su comercialización como flores de lujo en Emiratos Árabes Unidos, 2015”. Universidad autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México.
- Lugo Jorge, Del Águila Pedro, Vaca Rocío, Casas Hinojosa Idalia, Yañez Ocampo Gustavo (2017). “Abono orgánico elaborado con lodo residual y estiércol equino a través de vermicomposteo: una propuesta como mejorador de suelo”. Universidad Nacional Autónoma de México, Revista Internacional de Contaminación Ambiental, vol. 33, núm.3, pp. 475-484. Distrito Federal, México.
- Mejía (2015). “Manual del cultivo de hortensias de exportación bajo buenas prácticas agrícolas”. <https://www.google.com/search?q=Manual+del+cultivo+de+hortensias+de+exportaci%C3%B3n+bajo+buenas+pr%C3%A1cticas+agr%C3%ADcolas&oq=Manual+del+cultivo+de+hortensias+de+exportaci%C3%B3n+bajo+buena+s+pr%C3%A1cticas+agr%C3%ADcolas&aqs=chrome..69i57.3383j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8>. Última fecha de consulta: 04-Dic-2019

- Ministerio de Agricultura. (2011). *“Cadena Agropecuaria de papa, manejo y fertilidad de suelos”* Guía técnica de orientación al productor. Dirección general de competitividad agraria. Perú.
- Namesny, A., (2010). *“Una hortensia para colorear el verano”*. <http://www.horticom.com/>. Última fecha de consulta: 12-Oct-2017
- Navarro Marco Antonio. (2007). *“Suelos y Fertilizantes. Manual de Practicas. México”*
<http://www.cobachsonora.edu.mx:8080/wb3/work/sites/COBACH/resources/LocalContent/82/2/Suelos%20y%20fertilizantes.%20Manual%20de%20practicas.pdf>. Última fecha de consulta: 14-Dic-2017
- Nobile Toneatti, Marcelo José. (2006). *“Evaluación de la tolerancia a aluminio en 125 accesiones de bromo (Bromus valdivianus Phil.)”* Universidad AUSTRAL de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Graduandos. VALDIVIA, CHILE. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/egt664e/doc/egt664e.pdf> Última fecha de consulta: 18-Oct -2017
- Nuñez Zarur Juan Ricardo., Peña Catro Margareth. (2011). *“Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en la planta de potabilización de la empresa Aguas de Cartagena S.A E.S.P y estudio de la viabilidad económica de su reutilización como coagulante”*. Universidad de Cartagena, Facultad de ingeniería. Cartagena D.T y C.
- Ochoa, J., López Marín, J., González, A., Bañón, S., Fernández, J.A., Franco, J.A., Martínez Sánchez, J.J. (2008). *“El estado actual de la horticultura ornamental en Murcia”*. Horticultura 204 XXVI (1), 24:27.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2018). *“Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first addendum”* Ginebra, Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

- Panizza de León Amalia (2009). “Evaluación de la fitoextracción de aluminio en condiciones ácidas”. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, México
- Pavón Silva Thelma Beatriz., Pacheco Salazar Víctor F., Cárdenas Zuazo Luz María. (2004). “*Tratamiento de lodos de una potabilizadora para la recuperación de aluminio y hierro como coagulantes*”. Pág. 1-8. Facultad de Química. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca. Estado de México.
- Paz Castro Carmen, Henríquez Olivia, Freres Rodolfo (2007). “Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la región metropolitana de Santiago”. *Revista Geografica Norte Grande*, núm. 37. pp. 35-47.
- Peñate Montejo Rosa Isabela (2011). “Uso de bacterias fijadores de nitrógeno (*Bacillus* spp.), bioradicante y sábila (*Aloe vera*) en el enraizamiento de esquejes de hortensia (*hydrangea macrophylla*). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura. Saltillo, Coahuila, México.
- Pérez Cebrián Alberto (2016). “Estudio bibliográfico del uso de lodos de depuradora en suelos agrícolas”. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela politécnica superior de Gandia. Gandia.
- Pérez Leal Fernando (2017) “*Fisiología vegetal, parte III, Nutrición mineral*” Universidad Nacional de Ucayali-Perú.
- Piña Soberanis Martín., Sandoval Yoval Luciano, Sánchez Guzmán Laura O., Montellano Palacios Leticia. (2000) “*Análisis mediante microscopía electrónica y difracción de rayos-x de los lodos generados en la potabilización*”

del agua durante su tratamiento". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Pág. 1-14. Juicatepec. Morelos.

- Quiroga Alberto y Bono Alfresco. (2012). *"Manual de fertilidad y evaluación de suelos"*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Anguil, La Pampa, Argentina.
- Ramírez Zamora Rosa María, Nathalie Roberte Chantal Cabirol, Sandra Millán Hernández, Fabricio Espejel Ayala, Arturo Rodríguez Cruz, Marcelo Rojas. (2005-2006). *"Aprovechamiento de los lodos generados en la planta potabilizadora Los Berros, sistema Cutzamala, primera etapa"*. Eliminación de Parásitos, Tratamiento y Reúso de Aguas. p.188-190. Ingeniería Ambiental. México.
<http://www.elaguapotable.com/Lodos%20de%20la%20ETAP%20Los%20Berros.pdf>. Última fecha de consulta: 28-Dic-2018
- Ramos Agüero David, Terry Alfonso Elein (2014). "Generalidades de los abonos orgánicos: Importancia del bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas". Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, La Habana, Cuba Cultivos Tropicales, vol. 35, núm.4, pp.52-59.
- Rucks L., García F., Kaplán A., Ponce de León J., Hill M. 2004. *"Propiedades Físicas del suelo"*
<http://www.fagro.edu.uy/~edafologia/curso/Material%20de%20lectura/FISICAS/fisicas.pdf>. Última fecha de consulta: 28-Dic-2018
- Ruiz Mora Fátima Elizabeth. (2011). *"Utilización de los lodos generados en el proceso de potabilización del agua de la planta de tratamiento "Casigana", como aditivo para suelos de cultivo"*. Universidad Técnica de Ambato, Facultad de ciencias e Ingeniería en alimentos. Ambato. Ecuador.

- Salcedo Pérez Eduardo, Vázquez Alarcón Antonio, Krishnamurthy Rediar Laksmy, Zamora Francisco, Hernández Álvarez Efrén, Rodríguez Macías Ramón. (2007). “Evaluación de lodos residuales como abono orgánico en suelos volcánicos de uso agrícola y forestal en Jalisco, México”. Asociación interciencia, Interciencia, vol.32, núm.2, pp.115-120. Caracas, Venezuela.
- Sandoval Y. Luciano, (2009). “*Estudio Piloto para reducir el volumen de lodos de Plantas Potabilizadoras*”. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Pág. 1-13. Juitepec, Morelos. México.
- Sandoval Yoal Luciano., Montellano Palacios Leticia., Piña Soberanis Sánchez Guzmán Laura Olivia. (2000). “*Potencial Zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lodo a disponer*”. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. p. 1-15. Juitepec. Morelos
- Sandoval Yoal Luciano., Montellano Palacios Leticia., Martín Dominguez Alejandra, Sánchez Guzman Laura, Santana Ramírez Ma de Lourdes, Moran Plata Mario. “*Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización del agua*”. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/peru/mexapa045.pdf>. Última fecha de consulta: 17-Oct-2017
- Serrato Cuevas Rodolfo. (2019). Curso “*Interpretación de análisis de suelos*”. Asociación de ingenieros egresados de la facultad de ciencias agrícolas de la UAEMex. Del 09 de noviembre al 07 de diciembre del 2019. Metepec. Edo de México.
- Soto Gabriela y Meléndez Gloria (2004). “Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos”. Manejo integrado de plagas y Agroecología, Costa Rica, No. 72, p.91-97.

- Torres Cortés. (2017). “Propuesta para el aprovechamiento de los lodos generados en la PTAR de la empresa Regional Aguas del Tequendama”. Facultad de Ingenierías, programa de ingeniería química. Bogotá.
- Torres González Jorge Alejandro (2009). “*Aplicación de lodo industrial crudo en la producción de lili en maceta*”. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, Buenavista Saltillo, Coahuila, México.
- Valdeón, J., (2008). “*Hortensias, color y frescura estivales*”. QEJ. Bricojardinería & paisajismo: Revista profesional de distribución en horticultura ornamental y jardinería, ISSN 1132-3493, N° 166, p. 24-25.
- Valdés Illán Raquel. (2011). “Cultivo e hortensia en maceta bajo agua residual depurada salina: eficacia el lavado con agua buena” Departamento de producción Vegetal, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena.
- Villanueva Quispe Madelí Teódula. (2018). “*Aplicación de Biol elaborado a base de sangre de vacuno para promover el cambio de coloración en flores de hortensia (hydrangea macrophylla T.) en condiciones de Acobamba-Huancavelica*”. Universidad Nacional de Huancavelica, Facultad de Ciencias Agrarias. Acobamba- Huancavelica.
- Villegas G. Juan David., Castaño R. Juan Mauricio., Paredes Cuervo Diego. (2005). “*Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en plantas de potabilización de agua*”. Scientia et Technica. Año XI. No. 28. p. 223-228. Pereira