



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

**Uso de lodos residuales de un humedal
construido como sustrato para el desarrollo
inicial de *Pinus cembroides* Zucc.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
B I Ó L O G A
P R E S E N T A:
BRENDA CANTELLANO OCÓN

DIRECTORA DE TESIS: M. EN C. BALBINA VÁZQUEZ BENÍTEZ



MÉXICO, D.F.

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Agradezco a nuestra máxima casa de estudios la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por haberme formado profesionalmente, a todos mis maestros y compañeros.

A la Profesora Balbina Vázquez Benítez por sus enseñanzas durante este tiempo, por su valiosa ayuda en la realización de este trabajo y por todo su apoyo.

Un agradecimiento especial al M. en C. Ramiro Ríos Gómez por compartir sus conocimientos en cada una de mis dudas, por su trato personal, su disposición, por brindarme sus consejos y sobre todo por siempre creer en mí.

Al Dr. Eloy Solano Camacho por todas y cada una de sus observaciones y comentarios en la revisión de este trabajo, así como por brindarme su enseñanza y conocimiento.

Al profesor Juan Romero por su apoyo en la revisión de este trabajo.

A todos y cada uno de mis profesores en esta facultad por brindarme siempre su apoyo y orientación.

Dedicatorias

A ustedes papás, Lulú y Eliseo, por ese amor y apoyo tan incondicional, pero sobre todo por enseñarme con la mejor herramienta que pudieran tener, su gran ejemplo a seguir, el de personas triunfadoras.

A mis hermanas Xóchitl y Marisol por su apoyo y entusiasmo en cada etapa de mi vida, las quiero mucho chinitas.

A Julio por su paciencia, amor, amistad y sentido del humor, por haber estado a mi lado en cada paso de este trabajo, por siempre creer en mí y crecer conmigo.

A Emiliano, porque con su sola mirada y sonrisas logra llenarme de fuerzas para seguir, te amo.

Este trabajo no hubiera sido posible sin ustedes, gracias.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	1
ÍNDICE DE CUADROS.....	2
I. RESUMEN.....	3
II. INTRODUCCIÓN.....	4
III. MARCO TEÓRICO.....	6
3.1. Tratamiento de aguas residuales con humedales.....	6
3.2. Lodos residuales, tratamiento y usos.....	7
3.3. Germinación y desarrollo inicial.....	14
3.4. <i>Pinus cembriodes</i> Zucc.....	16
III. JUSTIFICACIÓN.....	20
IV. ÁREA DE ESTUDIO.....	21
V. OBJETIVOS.....	22
VI. HIPÓTESIS.....	23
VII. MATERIAL Y MÉTODOS.....	23
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
8. 1. Propiedades químicas y físicas de los sustratos.....	27
8.2. Caracterización morfológica de la semilla.....	32
8.3. Desarrollo post-emergente.....	33
8.4. Supervivencia.....	37
8.5. Altura de las plántulas.....	39
8.5. Longitud de hoja.....	45
8.6. Biomasa seca.....	47
8.7. Longitud de la raíz.....	49
IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
X. LITERATURA CITADA.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Núm.		Págs.
1	Esquema de las etapas de la germinación según Bewley (1997).	16
2	Localización del Valle del Mezquital, Hidalgo.	22
3	Recolección de lodos en el Valle del Mezquital, Hidalgo.	24
4	Recolección de lodos en el Valle del Mezquital, Hidalgo.	24
5	Almácigos empleados para la germinación de <i>Pinus cembroides</i> .	26
6	Textura de los sustratos.	30
7	Ejemplares emergidos en almacigo.	33
8	Desarrollo post-emergente de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> , germinadas en diferentes sustratos.	34
9	Plántulas de <i>Pinus cembroides</i> trasplantadas a bolsas de plástico después de 40 días a la siembra.	37
10	Sobrevivencia de <i>Pinus cembroides</i> en los tres sustratos.	38
11	Diferencia significativa de altura de tallo para los tres sustratos.	40
12	Incremento de la altura promedio en plántulas de <i>Pinus cembroides</i> que crecieron en diferentes sustratos.	40
13	Variación de la altura de las plántulas en suelo de monte a lo largo del tiempo.	41
14	Crecimiento de las plántulas en mezcla de suelo de monte y lodos.	41
15	Crecimiento de las plántulas en lodo.	41
16	Longitudes de raíz, tallo y hoja; así como su peso en seco.	43
17	Comparación de medias de la longitud del tallo en los tres sustratos.	45
18	Comparación de medias de peso seco en los tres sustratos.	49
19	Comparación de medias de la longitud de raíces en los tres sustratos.	51

ÍNDICE DE CUADROS

Núm.		Págs.
1	Caracterización y composición de lodos según Hernández (1992).	8
2	Técnicas empleadas en las determinaciones físicas y químicas de los sustratos.	25
3	Propiedades químicas de los diferentes sustratos utilizados en la propagación de <i>Pinus cembroides</i> .	27
4	Relación de arena, limo y arcilla en los diferentes sustratos.	29
5	Características morfológicas de las semillas de <i>Pinus cembroides</i> .	32
6	Ejemplares germinados por semana.	
7	Análisis de varianza para sobrevivencia inicial.	39
8	Análisis ANOVA para la altura de plántulas de <i>Pinus cembroides</i> que crecieron en tres sustratos diferentes.	42
9	Análisis de varianza para altura de tallo en los tres sustratos.	43
10	Prueba de rangos múltiples para las variables de tipo de sustrato para tallo.	44
11	Análisis de varianza para longitud de hoja en los tres sustratos.	45
12	Prueba de rangos múltiples, método: 95.0 porcentaje LSD para hoja.	46
13	Diferencias entre las medias para peso seco.	47
14	Componentes entre y dentro de grupos para peso seco.	47
15	Pruebas de rangos múltiples para peso seco (medias).	48
16	Pruebas de rangos múltiples para peso seco (diferencias significativas).	48
17	Componentes entre y dentro de grupos para longitud de raíz.	49
18	Pruebas de rangos múltiples para raíz. Método: 95.0 porcentaje LSD.	50
19	Peso seco y longitud de raíz, tallo y hojas de las plántulas.	51

I. RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales genera lodos que pueden presentar elementos tóxicos al ambiente y la salud humana. Sin embargo, pueden emplearse como sustrato para el desarrollo vegetal, esta alternativa permitiría reducir la extracción de suelo de monte con los beneficios para la conservación de áreas naturales. El objetivo de este trabajo es evaluar el desarrollo plantular y crecimiento temprano de *Pinus cembroides* Zucc. en sustrato de lodos derivados de un sistema de tratamiento de aguas, suelo de monte y mezcla lodo-tierra. Para tal efecto se obtuvieron lodos y suelo de monte de un sistema basado en humedales comparando su efecto en la germinación y desarrollo de *Pinus cembroides*. Se determinó textura, materia orgánica, pH, densidad aparente, densidad real, pH, capacidad de intercambio catiónico, potasio, fósforo y nitrógeno en los sustratos. Las semillas se caracterizaron morfológicamente y se realizó un diseño experimental al azar empleando análisis de varianza para evaluar el efecto del sustrato.

Destaca la mayor cantidad de materia orgánica, fosforo, capacidad de intercambio catiónico y potasio en el suelo de monte, con respecto al lodo y la mezcla, mientras que la textura fue muy similar entre ellos. Las semillas presentaron la morfología característica de *Pinus cembroides* y el desarrollo post-emergente fue similar en los tres sustratos. La emergencia a los 40 días fue del 80 por ciento y la sobrevivencia inicial, así como altura fueron similares en los tres sustratos. Por el contrario, se observaron diferencias significativas en longitud de raíz, tallo, hoja y biomasa seca, destacando los valores más altos en suelo de monte y los más bajos en lodos, encontrándose la mayor diferencia en raíz y biomasa seca. El lodo puede ser empleado como sustrato alternativo en la germinación, el desarrollo post emergente y la supervivencia de plántulas, pero no se recomienda para las etapas posteriores, pues se corre el riesgo de limitar el crecimiento, particularmente de raíces y biomasa seca.

II. INTRODUCCIÓN

La sociedad humana ha ejercido una fuerte presión sobre el ambiente con el objetivo de satisfacer las necesidades de crecimiento y desarrollo socioeconómico. Debido a que muchas de estas acciones son dañinas, se han afectado la vegetación original, el suelo, el agua y la atmósfera. Por esto, es necesario buscar alternativas para el manejo de los recursos naturales sin causar daño y experimentar con opciones que permitan la recuperación de los ecosistemas perturbados. El tratamiento y reuso de aguas residuales mediante humedales es una alternativa viable para comunidades rurales debido a que sus requerimientos de inversión y mantenimiento son relativamente bajos (Belmont *et al.*, 2004). Además de la obtención de agua con mejor calidad, este tipo de tratamiento genera lodos residuales. Cuando estos materiales se estabilizan, deshidratan y mineralizan se convierten en biosólidos que pueden aprovecharse de diferentes maneras (SEMARNAT, 2003; GOEDOMEX, 2006). Los biosólidos contienen un alto porcentaje de materia orgánica y también presentan nitrógeno, fósforo y trazas de elementos esenciales para el crecimiento de plantas (Elliot y Dempsey, 1991), por ello son potencialmente útiles como sustrato alternativo para el desarrollo vegetal. Sin embargo, estos materiales pueden presentar elementos tóxicos que dañen las plantas, por lo que es necesario evaluar su uso como sustrato alternativo para el crecimiento y desarrollo vegetal. Uno de los sustratos con mayor uso en la producción vegetal es el suelo de monte, que por su contenido de materia orgánica, asegura elevados rendimientos (SARH, 1985; Fernández, 1986). Sin embargo, para abastecerlo se requiere extraerlo de bosques naturales, lo que produce un severo daño. Su obtención, es cada vez más difícil y costosa, debido a que se han establecido políticas que limitan su extracción, para proteger áreas naturales (SEMARNAT, 1996).

Ante estas limitaciones, se han desarrollado sustratos alternos como los desechos de industrias que presentan alto contenido de materia orgánica, composta y cortezas de árboles (Altamirano y Aparicio-Rentería, 2002). El sustrato tiene un efecto directo en el desarrollo inicial de la planta (Niembro y Fierros,

1990), por lo que es necesario realizar ensayos para determinar aquellos en los que se obtengan los mejores resultados.

En los ambientes áridos y semiáridos donde suelen prevalecer suelos poco profundos con bajo contenido de materia orgánica, como es el Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo, se considera que la utilización de lodos residuales generados en un sistema de tratamiento de aguas residuales puede ser una alternativa como sustrato para el crecimiento y el desarrollo de plantas, debido a su alto contenido de materia orgánica. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el desarrollo de las plántulas y crecimiento temprano de *Pinus cembroides*, en lodos residuales como sustrato alternativo. Los lodos corresponden a un humedal construido de flujo subsuperficial, localizado en el Valle del Mezquital, municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo y se emplearán en *Pinus cembroides*, especie que ha sido utilizada en la región con fines de reforestación estatal y federal.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. Tratamiento de aguas residuales con humedales.

Al conjunto de todo lo que recogen los drenajes como los desechos domésticos, los residuos industriales, las aguas superficiales y domésticas que se vierten en el sistema de alcantarillado, se le denomina agua residual. Su composición es aproximadamente de 99 por ciento de agua 0.02 a 0.003 por ciento de sólidos suspendidos y sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas. De no llevar a cabo un tratamiento, estas aguas podrían causar la propagación de microorganismos patógenos, contaminación de cuerpos receptores de agua e incluso la eliminación de vida acuática y daños al ecosistema. Los humedales son ecosistemas inundados temporal o permanentemente con características biológicas, físicas y químicas que les permiten remover y transformar contaminantes (Hammer y Bastian, 1989). El material particulado se retiene debido al flujo laminar característico y la resistencia proporcionada por el sustrato y las raíces de las plantas acuáticas. Los sólidos suspendidos se sedimentan por la baja velocidad de flujo.

De acuerdo con Benefield y Randall (1980) la remoción biológica de los contaminantes que se presenta porque algunos de ellos se transforman en compuestos que las plantas pueden asimilar, como es el caso del nitrato, el amonio y los fosfatos, incluso pueden acumular de manera notable otros contaminantes, entre ellos metales pesados. Los microorganismos realizan transformaciones bioquímicas para la remoción de contaminantes; las bacterias utilizan carbono de las aguas residuales y la convierten en bióxido de carbono o metano. Asimismo, eliminan diversas formas de nitrógeno al transformarlo en gas nitrógeno mediante la desnitrificación. La remoción química más importante es la adsorción que provoca la inmovilización de contaminantes por intercambio catiónico. Muchos componentes de las aguas residuales contienen cationes, como el amonio y metales. Varios metales y compuestos orgánicos se pueden inmovilizar en el suelo vía la absorción química de las arcillas y los óxidos de hierro, aluminio y materia orgánica. El fosfato también puede unirse con la arcilla y los óxidos de Fe y Al a través de la absorción química, o bien puede también precipitarse con los óxidos de hierro. La volatilización del amoníaco puede dar lugar a la remoción

significativa de nitrógeno, si el pH del agua es mayor que 8,5 (Benefield y Randall, 1980).

3.2. Lodos residuales, tratamiento y usos.

Generalmente todas las actividades humanas, domésticas y productivas generan contaminantes, estos consisten en materia o energía que al incorporarse al ambiente modifican la composición de los ecosistemas naturales afectando la calidad del aire, del agua o del suelo y perjudicando la salud humana, la flora o la fauna nativas (Oliver, 1981). Ante el incremento de los niveles y tipos de contaminantes, se han desarrollado diversos enfoques y procedimientos para su prevención, reducción y tratamiento, entre los que se encuentran el vertido controlado, la incineración y el compostaje. Así mismo, la eliminación de residuos tóxicos y peligrosos contempla el vertido al mar y el movimiento transfronterizo de los mismos, para depositarlos en zonas degradadas.

El Atlas del Agua en México (CONAGUA, 2009) señala que se descargan 7.66 Km³/año de aguas residuales en los centros urbanos y se tratan 2.50 Km³/año. En el año 2007, las 1,710 plantas de tratamiento en operación en el país procesaron 79.3 m³/s, lo que corresponde al 38.3por ciento de los 207 m³/s que recolectan en las alcantarillas. Esta infraestructura genera lodos residuales donde se retienen una gran cantidad de contaminantes. El lodo resultante debe analizarse de acuerdo con la norma NOM-52-ECOL-1993 para determinar si es peligroso en cuanto a corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad y biológico infeccioso (SEMARNAT, 1993). La composición de los lodos depende del proceso que les da origen y en general son descargados en las alcantarillas, cuerpos de agua o cielo abierto. La composición genérica de los lodos (Hernández, 1992) se señala en el cuadro 1.

Cuadro 1. Caracterización y composición de lodos según Hernández (1992).

Parámetros	Lodos primarios	Lodos secundarios (mezcla)	Lodos digeridos
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7.6
Contenido de agua (por ciento)	92-96	97.5-98	94-97
ssv (por ciento ss)	70-80	80-90	55-65
Grasas (por ciento ss)	12-14	3-5	4-12
Proteínas (por ciento ss)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (por ciento ss)	8-10	6-8	5-8
Nitrógeno (por ciento ss)	2-5	1-6	3-7
Fósforo (por ciento ss)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Bacterias patógenas (NMP /100ml)	10 ³ -10 ⁵	100-1000	10-100
Metales pesados (por ciento ss) (Zn, Cu, Pu)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

Ssv: Sólidos suspendidos volátiles, NMP: Número más probable, ss: Sólidos suspendidos.

En México no existe una cifra oficial de producción de lodos y muy pocas plantas le dan tratamiento (Moeller, 1997). Sin embargo, como ejemplo se puede señalar el caso de la ciudad de Puebla, donde existen cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, de las cuales dos de ellas producen lodos con un volumen anual aproximado de 70,000 m³ (González *et al.*, 2009). En España se estima que la producción anual de estos residuos es de cuatro millones de toneladas en peso seco, aproximadamente.

Contaminantes en lodos residuales.

La remoción de contaminantes durante el tratamiento de las aguas residuales, tanto municipales como industriales, trae siempre como consecuencia la formación de lodos residuales con subproductos indeseables difíciles de tratar y que implican un costo extra en su manejo y disposición.

La concentración de contaminantes potencialmente peligrosos en las aguas residuales municipales y el lodo resultante varían considerablemente de un lugar a otro, dependiendo del uso que se les ha dado a las aguas, lugar del que provengan y de las descargas puntuales de fuentes contaminantes. La frecuencia de detección de contaminantes inorgánicos, varía del 50 al 100 por ciento y se concentran en el lodo residual durante el tratamiento de las aguas residuales. Por otro lado, la detección de los contaminantes orgánicos es menor, usualmente en un intervalo de 5 al 10 por ciento. Así, los lodos pueden constituir un riesgo para la salud, a los cultivos y a los ecosistemas en general (Page y Chang, 1994; Mazzarino *et al.*, 1997).

La contaminación de los lodos residuales con metales pesados, es una fuerte amenaza al ambiente por el riesgo potencial de su lixiviación hacia los mantos freáticos y aguas superficiales y por su entrada a la cadena alimentaria. Los metales pesados se encuentran de manera natural en la litósfera, hidrósfera y atmósfera en concentraciones tales que por lo general no perjudican las diferentes formas de vida. Sin embargo, las actividades humanas han ocasionado un paulatino aumento de dichas concentraciones en los diferentes componentes del ambiente. Los principales metales pesados presentes en los lodos son el zinc, el cobre, el níquel, el cadmio, el plomo, el mercurio y el cromo. Su potencial de acumulación en los tejidos humanos y su bio-magnificación suscitan preocupaciones. Los metales están siempre presentes en concentraciones bajas en las aguas residuales domésticas, pero las concentraciones que preocupan a los especialistas se encuentran en las aguas residuales industriales (Fytianos y Charantoni, 1998).

La elevada concentración de nutrimentos y materia orgánica representan un peligro por su potencial de eutrofización de las aguas subterráneas y

superficiales. Sin embargo, se pueden considerar como fertilizantes valiosos que pueden aplicarse al suelo. Los contaminantes orgánicos como plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, agentes tensoactivos y muchas otras moléculas orgánicas complejas, generalmente con poca solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción, tienden a acumularse en los lodos.

Todos estos contaminantes son motivo de preocupación por sus efectos potenciales sobre el ambiente y la salud humana. Una característica relevante es su variado potencial de biodegradación. Muchos se biodegradan lentamente, por lo tanto los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales con tiempos de residencia más largos, tendrán una mayor capacidad para biodegradar estos compuestos indeseables. La biodegradación también puede ocurrir después de esparcir los lodos en el suelo o durante la elaboración de composta.

Los daños a la salud humana se agrupan en dos tipos, los contaminantes químicos y los organismos patógenos. Tanto la exposición al agua residual como a los lodos residuales podrían provocar la transmisión de patógenos. Uiga y Crites (1980) señalan que la absorción total por el hombre, de contaminantes químicos y patógenos procedentes de la aplicación de lodos a las tierras de cultivo, es poco importante y probablemente no causará efectos adversos para la salud. Sin embargo, a pesar de que cada vez se avanza en la investigación sobre el papel ecotoxicológico de los contaminantes orgánicos en el sistema suelo-planta-agua y en la cadena alimentaria, es aún no es claro su efecto y no es posible formular lineamientos de uso (Chang *et al.*, 1995). Los agentes patógenos más importantes que se han encontrado en los lodos residuales son bacterias, los virus (especialmente enterovirus), protozoos, tremátodos, céstodos y nemátodos. Los residuos de animales sacrificados o muertos accidentalmente, los desechos hospitalarios y funerarios, entre otros, pueden elevar la carga y la diversidad de patógenos en el influente. Para que cualquier vertido de lodos sea seguro, se precisa la eliminación o la inactivación eficaz de estos patógenos. Para ello, se pueden aplicar a los lodos una serie de tratamientos, como pasteurización, digestión aerobia o anaerobia, elaboración de composta, la estabilización con cal, almacenamiento en estado líquido, deshidratación y almacenamiento en seco.

Tratamiento de lodos.

El tratamiento de aguas residuales es una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que genera enormes volúmenes de lodos orgánicos altamente putrescibles. Para facilitar su manejo, se someten a estabilización para así adquirir la categoría de biosólidos (SEMARNAT, 2003). La posterior utilización, sus cuidados y restricciones ambientales, dependerán de la concentración de metales pesados, contaminantes tóxicos y organismos patógenos. La persistencia de algunos metales y sus riesgos para la salud humana y medioambiental, imponen una activa vigilancia de todos los procesos de utilización y disposición final.

Existen varios métodos para reducir su volumen y estabilizar a los lodos, como son espesamiento, deshidratación, digestión anaeróbica, aeróbica, adición de compuestos químicos e incineración. Con estos métodos se pretende reducir su actividad biológica y química, así como la presencia de organismos patógenos (Dégremon, 1980). La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 establece los límites máximos permisibles de contaminantes contenidos en los lodos y los biosólidos, para su aprovechamiento y disposición final. Los lodos estabilizados o biosólidos son considerados residuos asimilables y, aunque no pueden clasificarse como tóxicos ni peligrosos, si poseen contaminantes que obligan a su tratamiento (SEMARNAT, 2003). Esta norma establece, en el punto 3.5, que los biosólidos son lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrimentos y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento.

Una de las alternativas para la disposición final de los lodos es su utilización como mejoradores de suelos agrícolas, debido a que son una fuente importante de nutrimentos para los cultivos por su alto contenido de materia orgánica, macronutrimentos como el nitrógeno, fósforo, potasio y algunos micronutrimentos como cobre y zinc (Azevedo *et al.*, 2003). Sin embargo, esta práctica puede crear problemas de contaminación por la presencia de elementos potencialmente tóxicos presentes en los lodos, los cuales pueden ser movilizados hacia la solución del suelo, estar en posición de ser absorbidos por las plantas o ser

lixiviados hacia los mantos acuíferos afectando los suministros de agua potable (Álvarez *et al.*, 2002).

Otro problema asociado con el uso de lodos es su contaminación por organismos patógenos. Sin embargo, se ha registrado que ningún virus puede sobrevivir a lodos estabilizados aeróbicamente durante 14 días (Lynam *et al.*, 1972). En sistemas de tratamiento por estabilización anaeróbica, los lodos normalmente exceden ese tiempo de digestión.

Reuso de lodos residuales.

Los altos costos del uso de fertilizantes químicos así como el riesgo de contaminación de suelo, agua y flora, con la presencia de residuos que estos ocasionan, representan una problemática relevante. Los metales pesados y contaminantes orgánicos presentes en los lodos pueden limitar su utilización como fertilizantes, por lo que es de gran importancia reducir las concentraciones de sustancias tóxicas que presentan. El origen de los lodos, sea de hogares o de industrias, determina su composición química. Los materiales provenientes de sistemas industriales o lluvias, contribuyen significativamente a la presencia de metales pesados (Fytianos y Charantoni 1998).

Uso agrícola.

Los desechos orgánicos en general y los lodos residuales en particular pueden ser reciclados en la agricultura ya que pueden proporcionar materia orgánica al suelo (Petruzelli, 1989). La aplicación agrícola de los biosólidos se basa en la posibilidad que tienen para satisfacer los requerimientos de materia orgánica de los cultivos. La aplicación de los residuos para este fin implicaría la solución de dos problemas ambientales i) la reducción de una fuente potencial de contaminación y ii) el aprovechamiento de un recurso de bajo costo que permite mejorar las características físicas, químicas y biológicas del suelo, con un aumento de su productividad. El uso de lodos residuales en suelos agrícolas se ha incrementado debido a su bajo costo en comparación con el de los fertilizantes, además de que suministran microelementos a las plantas como boro, cobre, hierro, magnesio, azufre y zinc. Además, son una fuente importante de nitrógeno y fósforo y pueden

mejorar la estructura y la capacidad de retención de agua del suelo (Hue *et al.* 1988; Oberhaster 1991).

Los lodos se han empleado en el cultivo de diferentes hortalizas, entre ellas el tomate (Utria, 2007). Sin embargo, Wu y Martínez (2000) demostraron que la germinación de semillas de este cultivo disminuyó en un 33 por ciento a 55 por ciento cuando la concentración del lodo aumentó. Durante el período de germinación ocurren numerosos procesos fisiológicos en los que la presencia de elementos fitotóxicos, como Cu, Ni o Zn (Shober y Sims, 2003), puede interferir alterando la viabilidad de la semilla y el desarrollo normal de las plántulas (Sobrero y Ronco, 2004). Las semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) son particularmente sensibles para estos bioensayos (Sobrero y Ronco, 2004). *L. sativa* es una especie indicadora del efecto de compuestos tóxicos y buena acumuladora de metales pesados en sus tejidos (Schmidt, 1997).

Uso forestal.

Los lodos residuales contienen un gran contenido de nutrimentos como el nitrógeno y cationes básicos como sodio, potasio, calcio y magnesio. Sin embargo, el pH del suelo de grandes zonas forestales puede acidificarse con la consecuente disminución de estos cationes por lo que necesitan un suministro adicional de nutrimentos así como también la adición de sustancias amortiguadoras. Una gran porción de los nutrimentos presentes en los lodos están enlazados con la materia orgánica de tal manera que están disponibles de manera gradual durante la mineralización. La materia orgánica también puede mejorar la capacidad para mantener el agua y los nutrimentos. Asimismo, la productividad forestal se afecta positivamente con el uso del lodo residual porque es fuente de nitrógeno y otros nutrimentos (Weetman *et al.*, 1993).

Una diferencia importante entre la aplicación de lodos a un sistema forestal y uno agrícola es la gran cantidad de materia orgánica con la que ya cuenta el suelo forestal. Las propiedades del suelo forestal son adecuadas para recibir lodos debido a que el carbono orgánico inmoviliza el nitrógeno disponible, se incrementa la infiltración minimizando el potencial de escurrimiento y se establece un sistema

radicular perene que permite la asimilación de nutrimentos para todo el año. En algunos países existen grandes áreas de bosque que están potencialmente disponibles para recibir lodos (Bastian, 1986).

La aplicación de lodos en áreas forestales, sin embargo, puede presentar conflictos potenciales debido al uso tradicional del suelo forestal, especialmente los vinculados con la recreación. Por ejemplo, los lodos esparcidos sobre vegetación tienen una apariencia y olor poco convincente, además de que puede afectar la calidad de plantas y hongos que son recolectadas para su consumo y venta. También se ha sugerido que la adición de lodos como fertilizantes puede afectar adversamente la vida silvestre del bosque a través de la cadena alimentaria (Henry, 1989).

Debido a que muchos sitios forestales se localizan en áreas con pendiente pronunciada, la aplicación de lodos puede causar la dispersión de las partículas o disolver los sólidos a través de la superficie por la estabilización del agua. Además, no todas las especies pueden responder igual o apropiadamente a las adiciones de lodo.

Edmonds (1976) señaló que después de un mes de la aplicación de un lodo, deshidratado y digerido anaeróticamente a una área forestal, ya no presentó coliformes fecales, aun cuando el lodo original contenía 1.8×10^{15} células/gramo. Tierney *et al.*, (1977) encontraron que ciertos virus presentes en agua residual y lodos no estabilizados persistieron por 11 días durante el verano, sin embargo, la población del virus decae rápidamente después de los primeros dos días. Kirkham (1974) encontró que los patógenos no son absorbidos por las raíces de las plantas a través del agua y la estabilización de lodos también disminuye considerablemente el mal olor.

3.3. Germinación y desarrollo inicial.

La germinación es el conjunto de eventos que comienzan con la toma de agua por la semilla quiescente y terminan con la elongación del eje embrionario (Bewley y

Black, 1994). La forma visible de que este proceso se ha completado es la emergencia de la radícula.

La iniciación de la germinación requiere que se cumplan tres condiciones. Primera, la semilla debe ser viable, es necesario que el embrión este vivo y sea capaz de germinar. Segunda, la semilla no debe estar en letargo y sin barreras fisiológicas, físicas o químicas que induzcan letargo. Tercera, la semilla tiene que estar expuesta a las condiciones ambientales apropiadas: disponibilidad de agua, temperatura adecuada, provisión de oxígeno y en ocasiones luz. Debido a las complejas interacciones entre el ambiente y condiciones específicas de letargo, dichas exigencias pueden cambiar con el tiempo y los métodos de manejo de las semillas también. Así, el segundo requisito evita el letargo y puede, a veces, satisfacerse proporcionando las condiciones ambientales apropiadas (Hartmann y Kester, 1984).

La germinación consta de tres etapas (figura 1): hidratación de la semilla, activación del metabolismo del embrión y crecimiento del mismo. La semilla inicia la germinación sólo cuando está lo suficientemente hidratada, para ello es necesario que ocurra imbibición de agua por difusión, capilaridad o presión osmótica, con el consecuente aumento de volumen (45 - 172por ciento), de tal manera que se crea una presión de turgencia hasta la ruptura de los tegumentos. Se inicia la respiración y la síntesis de proteínas. La activación del metabolismo del embrión inicia con la remoción o degradación del ácido abscísico, que inhibe el metabolismo y continua con la activación de enzimas y hormonas del crecimiento (giberelinas, auxinas y citocininas), posteriormente se genera un incremento de la respiración para la generación de energía metabólica; y se presenta la asimilación de compuestos simples al embrión (López, 2005).

De acuerdo con Altamirano y Aparicio-Rentería (2002) la sobrevivencia y crecimiento de las plántulas depende de diversos factores como la fertilidad y humedad del suelo ya que el suministro inicial de alimento lo obtiene a partir de la germinación y posteriormente se requiere cantidades adecuadas de agua, nutrimentos, minerales, oxígeno, bióxido de carbono, hormonas y una temperatura

favorable. Posteriormente, la plántula libera la testa y sus hojas cotiledonares comienzan a fotosintetizar y la raíz a absorber y dar estabilidad a la plántula (Copeland, 1976).

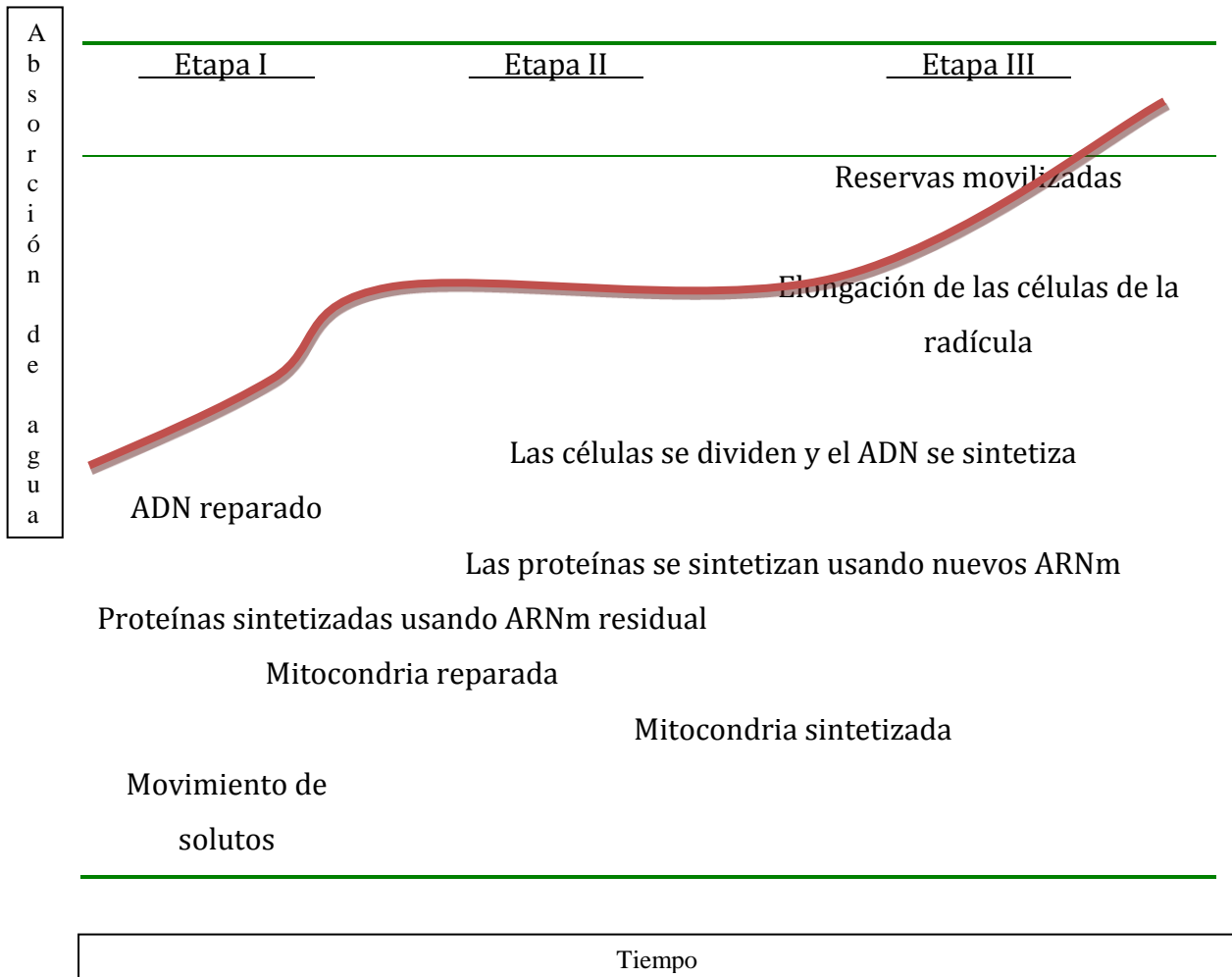


Fig. 1. Esquema de las etapas de la germinación según Bewley (1997).

3.4. *Pinus cembroides* Zucc.

Pinus cembroides es conocido en México como pino piñonero o piñon y tiene como sinónimos a *Pinus fertili*, *Pinus futilis*, *Pinus llaveana* y *Pinus osteosperma* (Vázquez-Yanes, et al. 1999). Pertenece a la familia Pinaceae, subgénero *Haploxyton*. Son pinos blandos y pertenecen a la sección *Paracembra*. Perry (1991) divide la sección *Paracembra* en dos grupos claramente definidos Subsección *Cembroides* y Subsección *Pineaceana*.

Los principales caracteres morfológicos que distinguen a las especies en la subsección *Cembroides* (pinos piñoneros) dentro del género *Pinus*, son las hojas y semillas. El grupo piñonero es el único en tener una completa reducción evolutiva en series de cinco a una hoja (acículas) por fascículo. Los pinos piñoneros son árboles perennifolios de poca altura (cinco a diez metros), raras veces hasta 15 metros y con frecuencia tienen de seis a ocho metros, con un diámetro a la altura del pecho de 30 cm y a veces hasta 70, copa redondeada y abierta en individuos maduros y piramidal en jóvenes, con follaje ralo, sobre todo en sitios muy secos, de color verde oscuro algo azulado, pálido a veces amarillento. Las hojas aciculares están agrupadas en fascículos de dos, tres y a veces cinco, éstos cubren abundantemente a las ramas y dejan una cicatriz en éstas cuando caen; sus conos maduran de septiembre a noviembre, éstos son cortos y tiene de cinco a 20 semillas (Robert, 1977).

Pinus cembroides suelen desarrollarse en laderas de cerros, y lomeríos, con pendientes secas y rocosas, al pie de las montañas. En clima templado seco hasta templado subhúmedo con precipitaciones de 365 a 450 mm anuales y con siete u ocho meses secos. Temperaturas que oscilan entre 7 °C hasta 40°C con promedios de 18 °C; alcanzando mínimas extremas de -7 °C y máximas de 42 °C o a veces mayores. Es una especie típica de suelos pobres, secos, pedregosos o calizos, grisáceos o negros, calcáreos con alto contenido de yeso, delgados en lomeríos y aluviones en los valles de muy buen drenaje y con pH de 4 a 8, normalmente prefiere los suelos de neutros a alcalinos (Vázquez-Yáñez *et al.* 1999).

Los bosques de pino piñonero son muy extensos en ambas cadenas montañosas de la parte norte del país. Conforman una vegetación de transición entre las formaciones xerófilas de la altiplanicie mexicana y las vertientes internas de las Sierras Madres Oriental y Occidental. Se asocia con especies de matorral arbustivo, encinares y pinares de climas semidesérticos. Es una especie con alto potencial adaptativo y de lento crecimiento. Las bajas temperaturas influyen favorablemente sobre el crecimiento del piñonero y la producción de conos, estos árboles tardan muchos años en fructificar por primera vez. Sin embargo, los bosques se regeneran fácilmente (Vázquez-Yáñez *et al.* 1999).

Pinus cembroides destaca entre las diversas especies de piñoneros registradas para la República Mexicana por presentar amplia distribución geográfica y mayor parte de la semilla para su comercialización. Aproximadamente, 2,500 semillas recién cosechadas pesan un kilogramo y su porcentaje de germinación es de alrededor del 60porciento , el cual puede ser mejorado si se somete a estatificación. Aparentemente, existen algunas variaciones en la producción de semillas, pues los recolectores las seleccionan con base en el color de la testa sana y distinguen fácilmente por lo menos tres tipos (“negros”, “caliandro” o “amilillo” y “guapaxte”); su reconocimiento por medio de otras características es difícil (Rebolledo, 1982).

Daniel *et al.*, (1982) mencionan que, independientemente del tipo de regeneración de los rodales (natural o artificial), se necesita más información acerca de los factores que influyen sobre el momento y la cantidad de semillas que se producen. Por diversas razones, es difícil hacer afirmaciones generales válidas que permitan caracterizar la producción de semillas en los árboles.

Los piñoneros no producen cosecha abundante de semillas cada año, sino que existe una cierta periodicidad en su producción, lo cual se manifiesta con una cosecha muy abundante en un año seguida de un periodo variable con baja producción (Daniel *et al.*, 1982). Por ejemplo, el piñonero colorado produce semillas abundantes a intervalos de cuatro a siete años aunque han sido registrados intervalos más cortos; Gottfried (1986) señala intervalos de tres a siete años para *Pinus monophylla*.

La producción de conos de un genotipo particular está influida por el desarrollo y el vigor de la copa, las características propias del árbol o su posición dentro del dosel (Daniel *et al.*, 1982; Pérez, 1988). Daniel *et al.*, (1982) y Gottfried (1986) mencionan que los árboles dominantes que tienen copas vigorosas bien desarrolladas y considerablemente expuestas a la luz son notables productores de semilla. Sin embargo, también se ha observado que los árboles menos vigorosos, cuando sus copas estén bien expuestas a la luz también producen abundantes cosechas de conos y semillas.

Esta periodicidad en la producción de semillas ha sido causa de debates y especulaciones. El hecho de que en determinados años la producción de semillas en coníferas sea elevada, está determinado en gran parte por la producción anual de yemas que abortan, permanecen latentes o se desarrollan para formar estructuras reproductivas. Estos procesos están influidos por el metabolismo del árbol y por factores climáticos. La diferenciación de yemas reproductivas hasta la formación de semillas maduras y viables depende de la influencia que sobre ellas ejerce el clima, la fauna herbívora, y las enfermedades (Daniel *et al.*, 1982).

El inicio de la producción de semillas ocurre más temprano y son más abundantes en las regiones situadas al sur de su área de distribución natural de la especie. Así mismo, la precocidad en la producción de semillas es mayor en los sitios cálidos y con exposición sur. Este fenómeno puede atribuirse en parte, a la posibilidad de que en estos sitios más expuestos ocurra una rápida diferenciación de las clases de copas. Sin embargo, al parecer existe un efecto ambiental directo sobre la producción de semillas en los sitios más empobrecidos. Independientemente de que la causa sea un contenido bajo de nutrimentos o la falta de agua, se producen pequeñas cantidades de semillas en edades juveniles, incluso a pesar de que el árbol pueda ser muy pequeño y deforme. A esta producción de semillas se le denomina cosecha de "crisis" y el fenómeno es análogo al estímulo de los árboles para producir semillas mediante daños mecánicos (Daniel *et al.*, 1982).

En el ciclo biológico del género *Pinus* la fase más crítica va de la germinación hasta el momento en que las plántulas se establecen, debido a que en este periodo ocurre el mayor porcentaje de mortalidad. Por lo anterior, si se requiere incrementar la cantidad de regeneración del bosque, deben comprenderse las características básicas del crecimiento de las plántulas, sobre todo en las especies de coníferas donde los índices de mortalidad son altos (Daniel *et al.*, 1982).

Musalem (1984) menciona que la germinación de semillas de *Pinus montezumae* ocurre en un rango amplio de los regímenes de luz y temperatura. Además, las semillas recientemente dispersadas son capaces de germinar sin

estratificación y no se ha observado pérdida de viabilidad después del almacenamiento en el suelo forestal por un año y medio.

Hawley y Smith (1982) observan que la situación ideal para el establecimiento de la regeneración natural se da generalmente cuando el suelo de la superficie es ligero, tiene una buena cantidad de agua y minerales y carece de cobertura vegetal viva. Así mismo, mencionan que el suelo mineral desnudo suele ser un medio mucho más favorable, ya que es relativamente estable en cuanto a humedad y conduce el calor con la rapidez suficiente para reducir el riesgo de temperaturas letales cuando está expuesto a la luz solar directa. Si el suelo forestal se extrae, se mejora la regeneración, pero esto hace que las plántulas crezcan poco y muestren signos de deficiencias nutrimentales.

Según Gottfried (1986) el pino piñonero se ha considerado generalmente intolerante a la sombra. Sin embargo, se ha observado un mayor número de plántulas creciendo a la sombra en la sombra de árboles maduros y robustos, y pocas entre los claros. Dicho autor señala que bajo estas condiciones la velocidad de crecimiento de las plántulas es baja pero, si se transplantan al poco tiempo de su establecimiento, éstas perecen.

III. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento de aguas residuales es necesario para reducir los impactos de las descargas a cuerpos naturales que provocan daños al ambiente y la salud humana. Sin embargo, todos los sistemas de tratamiento generan lodos residuales, éstos requieren un tratamiento para su adecuada disposición final. La estabilización y reuso de dichos lodos está contemplada en la normatividad mexicana, específicamente en las normas NOM-004-SEMARNAT-2002 y NOM-52-ECOL-1993, por ello es necesario hacer estudios para evaluar diferentes alternativas de uso. Existen aplicaciones de lodos tanto a suelos agrícolas como forestales también se han empleado como sustrato para la germinación de diferentes especies, como el tomate (Wu *et al.*, 2000) y lechuga (Sobrero y Ronco, 2004).

En México existen pocas experiencias donde se haya evaluado el uso de lodos residuales como sustrato para la germinación de semillas forestales. Esto es relevante para regiones áridas y semiáridas cuyos suelos se caracterizan por tener bajos niveles de materia orgánica. Estos lodos pueden tener gran potencial para apoyar programas de reforestación, por lo tanto es necesario determinar su efecto al utilizarse como sustrato en especies de interés forestal de regiones semi-áridas, como es el caso del *Pinus cemborides*. Esta especie es relevante para restaurar, conservar suelos, así como controlar su erosión. Además destaca por potencial ornamental y suministro de alimento y hábitat para la fauna silvestre (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999).

IV. ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo se desarrolló en la comunidad de Julián Villagrán, municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, localidad ubicada en el Valle del Mezquital. La zona es semidesértica con vegetación de matorral xerófilo (González, 1968).

En el Valle del Mezquital (figura 2) predomina un clima semiseco-templado con lluvias en verano. La temperatura y precipitación medias anuales es de 14.8 °C y 543.4 mm, respectivamente, esta última con la máxima incidencia en mes septiembre donde se registran 117.4 mm y el mínimo en enero con 8.8 mm (INEGI, 1992).

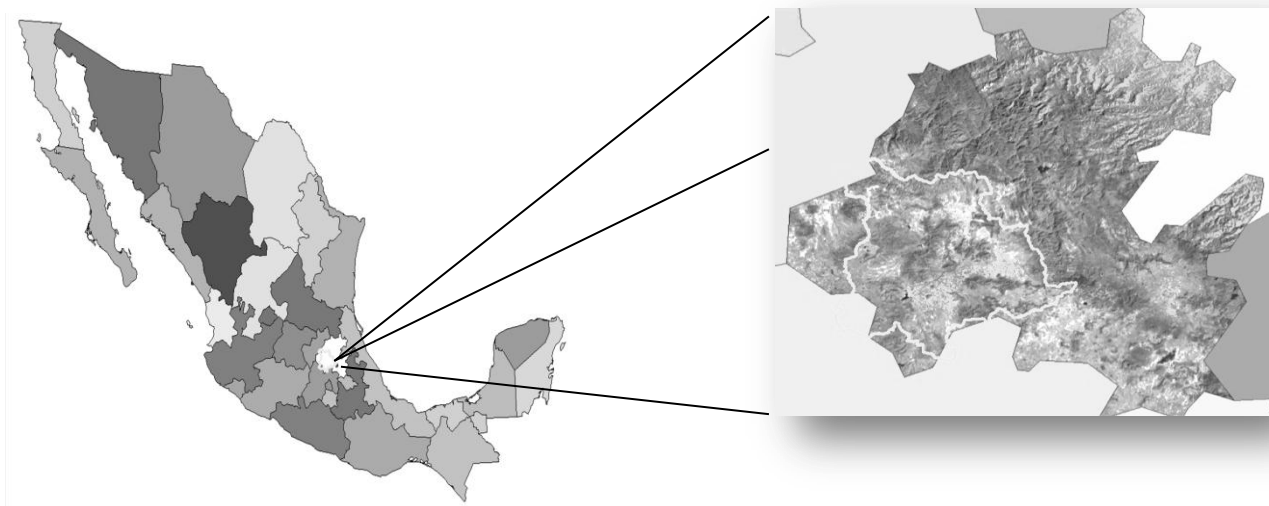


Fig. 2. Localización del Valle del Mezquital, Hidalgo.

V. OBJETIVOS

General

Evaluar el desarrollo plantular y crecimiento temprano de *Pinus cembroides* Zucc. en sustrato de lodos residuales, suelo de monte y mezcla lodo-tierra.

Específicos

- Determinar las propiedades físicas y químicas de los sustratos (textura, materia orgánica, pH, densidad aparente, densidad real), y comparar su efecto en la germinación y desarrollo de *Pinus cembroides*.
- Caracterizar morfológicamente las semillas de *P. cembroides*.
- Evaluar el desarrollo plantular a través de la altura del tallo, longitud de hojas y biomasa, en sustratos correspondientes.
- Evaluar el crecimiento temprano de esta especie en los sustratos: lodos, suelo de monte y mezcla de ambos.

VI. HIPÓTESIS

Si los lodos residuales provenientes de un sistema de tratamiento de aguas residuales como un humedal de flujo sub-superficial son ricos en materia orgánica y nutrimentos, entonces el desarrollo y crecimiento de *Pinus cembroides* Zucc. no presentará diferencias con el registrado en los otros sustratos utilizados.

VII. MATERIAL Y MÉTODOS

Fase de campo

Se obtuvieron lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales ubicado en el ejido de Julián Villagrán, municipio de Ixmiquilpan, en el Valle del Mezquital, estado de Hidalgo (figuras 3 y 4). De acuerdo con la norma NOM-AA-15-1985 (SECOFI, 1985) la recolección se llevó a cabo por el método del cuarteo. Se tomaron con una pala. Se tomaron los residuos formando aglomerado, éste se mezcló con una pala hasta su homogeneización. Posteriormente se dividió en cuatro partes iguales A, B, C, D se eliminaron las partes opuestas A y C empleando para el ensayo las partes B y D.

Por otro lado, Se recolectó suelo superficial de monte (de 0 a 7 cm de espesor) de la localidad de Hermosillo, zona aledaña a la comunidad de Julián Villagrán. El sitio tiene una vegetación de pino piñonero y el suelo es utilizado en la región como medio de edáfico en la germinación de las semillas y desarrollo de las plantas de pino.



Fig. 3 y 4. Recolección de lodos en el Valle del Mezquital, Hidalgo.

Se prepararon almácigos con los siguientes sustratos:

- 1.- Lodos residuales
- 2.- Suelo de monte
- 3.- Mezcla de suelo de monte y lodos residuales (50/50 v/v).

La semilla de *Pinus cembroides* se recolectó en una población natural de esta especie en el poblado de Hermosillo, municipio de Santiago de Anaya que se localiza a una altitud de 2,100 msnm. Se recolectó un kilogramo de semillas del piso forestal, en los primeros meses del año (febrero-abril). Durante la recolección se verificó que las semillas no mostrarán indicios de enfermedades o plagas.

Fase de laboratorio

Los sustratos se secaron a temperatura ambiente, luego se tamizaron en malla de 2 mm. Posteriormente se prepararon para determinar los parámetros físicos y químicos de textura, materia orgánica, pH, nitrógeno total, fósforo, potasio, densidad aparente y capacidad de intercambio catiónico, de acuerdo a las técnicas señaladas en el cuadro siguiente.

Cuadro 2. Técnicas empleadas en las determinaciones físicas y químicas de los sustratos.

Parámetro	Técnica
Textura	Hidrómetro de Boyoucus (Jackson 1970)
Materia orgánica	Walkley-Black sin aporte de calor (Jackson 1970)
pH	Potenciométrico relación suelo agua 1:2 (Jackson 1970)
Densidad aparente	Método de la probeta (American Society of Agronomy 1979)
Nitrógeno	Extraído con cloruro de potasio 2 N por arrastre de vapor.
Potasio	Extraído en acetato de amonio 1 N pH 7 relación 1:20 por espectrofotometría de emisión de flama.
Fósforo	Bray P-1
Capacidad de intercambio catiónico	Acetato de amonio 1 N, pH 7 centrifugación.

Para la caracterización morfológica se emplearon 50 semillas. A cada una de ellas se les registraron los siguientes atributos: largo, ancho, color, forma y textura. Las evaluaciones cuantitativas se indicaron como medias aritméticas. Por otro lado, se utilizaron 150 semillas para evaluar el crecimiento de *Pinus cembroides*. Estas semillas se remojaron en agua durante 24 h para ablandar la cubierta y favorecer la germinación (Batis *et al.*, 1999).

Se realizó un diseño experimental con un arreglo completamente al azar de seis almácigos (dos para cada tipo de sustrato) con 25 semillas cada uno,

sembrando un total de 150 semillas, que fueron colocadas en charolas plásticas transparentes con cubierta (fig. 5).



Fig. 5. Almacigos empleados para la germinación de *Pinus cembroides*.

Los almacigos se colocaron dentro de un invernadero localizado en la región de estudio. Se regaron cada tercer día con agua potable de una toma domiciliaria. Las semillas se sembraron dentro de los sustratos a una profundidad de un centímetro. 40 días después de la siembra y en el mismo invernadero, las plántulas se trasplantaron a bolsas de polietileno plástico de tres kilos, las cuales se llenaron con los sustratos respectivos y cada tercer día, durante 75 días se registró la altura de las plántulas.

Las diferencias entre los tratamientos se evaluaron mediante un análisis de varianza de tipo factorial 2 x 2, verificando los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Las variables que se determinaron fueron sobrevivencia inicial según Camacho-Morffín (1994). Para lo anterior se empleó el paquete estadístico Statgraphics Centurion XV Versión 15.2.06.

Después de los 75 días, se extrajeron las plantas de las bolsas de polietileno y se determinó la altura del tallo, desde el cuello de la raíz hasta la yema principal de crecimiento. Al final se midió la longitud de la raíz y del grupo de hojas de cada individuo, así como su biomasa en seco.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

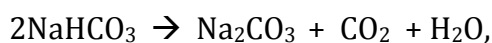
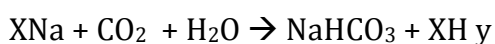
8. 1. Propiedades químicas y físicas de los sustratos.

El pH más alto se encontró en el sustrato conformado por lodo (8.45)(Cuadro 3) y representa un valor por arriba del recomendado por Vázquez-Yanes *et al.*, (1999) para el cultivo de *Pinus cembroides*. La mezcla lodo y suelo de monte tuvo un pH de 7.02. El pH neutro es el más apropiado para cultivar la especie, toda vez que tiene preferencia por suelos neutros a ligeramente alcalinos. Generalmente los lodos residuales presentan un pH ácido de alrededor de 6.72 (Montes-Rivera *et al.*, 2004).

Cuadro 3. Propiedades químicas de los diferentes sustratos utilizados en la propagación de *Pinus cembroides*.

Sustrato	pH	Nitrógeno mg/kg	Potasio mg/kg	CIC Cmol (+)/kg	Fósforo mg/kg	Materia Orgánica por ciento
Lodo	8.45	13.0	906.0	8.7	74.51	0.67
Suelo de monte	5.05	28.6	3,980.0	107.06	209.48	40.34
Mezcla	7.02	15.6	732.0	21.42	88.95	28.2

El pH de 8.45 de los lodos del humedal de Julián Villagrán se debe a que las aguas residuales tienen su origen en la Ciudad de México y cruzan a lo largo de su curso por suelo salino con fase sódica del ex lago de Texcoco, solubilizando estas sales y adquiriendo una carga de sodio que forma bicarbonatos y carbonatos de acuerdo con el equilibrio de las siguientes reacciones:



X=factor numérico.

Estas reacciones se presentan en el sistema, sobre todo si alcanzan elevadas concentraciones de Na^+ , lo cual puede ocurrir si se prolonga el tiempo en el que se renueve el sustrato o se incremente la evaporación en el humedal.

Destaca el bajo contenido de materia orgánica en el lodo (0.67), que lo hace un sustrato pobre en ese componente. En otros casos, como el de una laguna de planta tratadora en Durango, el lodo presentó 7.32 por ciento de materia orgánica. También se registró un bajo contenido de fósforo (74.51 mg/kg) comparado con la laguna de Durango (122 mg/kg). Con relación al potasio, este se encuentra en concentraciones de 906 mg/kg en el humedal de Ixmiquilpan contra 122 mg/kg. El bajo contenido de materia orgánica puede explicarse porque el agua residual que ingresa al sistema de tratamiento proviene de la zona metropolitana de la Ciudad de México, habiendo realizado un recorrido de aproximadamente 80 kilómetros en la red de canales del distrito de riego y con estancias de varios días en una o dos presas (Requena y Endhó). Esto provoca tanto la sedimentación como la oxidación de una parte de la materia orgánica. Además, los lodos derivados de sistemas de tratamiento convencional contienen mucha más materia orgánica debido a que se promueve la sedimentación de los sólidos suspendidos de grandes volúmenes de agua que no han tenido un procesos de autodepuración, situación que no ocurre en los sistemas de tratamiento basados en humedales de Ixmiquilpan, cuya agua se ha autodepurado parcialmente a lo largo de su curso de la Ciudad de México hasta Julián Villagrán.

La anterior interpretación puede hacerse extensiva para el caso de la capacidad de intercambio catiónico por su estrecha relación con la materia orgánica, ya que ésta contribuye con una parte de los sitios de intercambio dada la gran cantidad de grupos funcionales de su superficie (Fitzpatrick, 1996).

Por otra parte, la densidad aparente (cuadro 4) es óptima para el establecimiento y desarrollo de las especies vegetales y cabe únicamente enfatizar que el suelo de monte tiene una densidad baja debido a su estructura grumosa, alto contenido de materia orgánica y por su origen de materiales calcáreos, propios de la zona.

Cuadro 4. Relación de arena, limo y arcilla en los diferentes sustratos.

Sustrato	Arena por ciento	Limo por ciento	Arcilla por ciento	Textura	Densidad aparente t/m³
Lodo	41.3	45.2	13.5	Franco	1.06
Suelo de monte	85.6	10.6	3.8	Arena franca	0.4
Mezcla	49.6	43.4	7.0	Franco arenoso	1.0

La densidad aparente nos informa de manera directa sobre el porcentaje de espacio poroso, drenaje y permeabilidad, retención de humedad, compactación e indirectamente contenido de materia orgánica. En este caso la menor densidad se presenta en el suelo de monte por lo que ahí se tiene más espacio poroso, mayor drenaje y permeabilidad, así como menor compactación; caso contrario para el lodo y la mezcla. Sin embargo, Ortiz (1990) establece como límite una densidad de 1 t/m³ como un suelo que no posee una capa endurecida por lo que no limita el desarrollo de las raíces. Esto se aplica para los tres tipos de sustratos ya que los valores oscilan entre 0.4 y 1.06 t/m³. Sin embargo, la retención de humedad también está influida por la cantidad de materia orgánica, siendo mucho mayor en el suelo de monte (40.34 por ciento), donde se observó la mayor retención de humedad.

Para un adecuado desarrollo de las plántulas es necesario el suministro de agua para que los nutrimentos puedan estar disponibles, sin embargo, un exceso por drenaje ineficiente puede provocar inundación y carencia de oxígeno que limita la respiración de la raíces de la planta. Lo anterior está muy relacionado con la temperatura ya que el agua presenta un elevado calor específico por lo que amortigua los valores extremos y entonces una adecuada cantidad de humedad disminuye los valores extremos y favorece el crecimiento de las plántulas y los

juveniles. Tanto humedad como drenaje son necesarios para un buen desarrollo de las plantas, un buen drenaje implica aireación y por tanto condiciones para respiración de las raíces. Desde luego que la humedad genera las condiciones adecuadas para obtener este recurso y además los nutrientes en ella disueltos.

Con base en la textura (cuadro 4), los tres sustratos son adecuados ya que, de acuerdo con Vázquez-Yanes *et al.* (1999), el pino piñonero se desarrolla en laderas de cerros y lomeríos con muy buen drenaje. Estas condiciones pueden presentarse en sustratos con textura de franco a franco-arenosa, como los encontrados en los lodos, suelo de monte y mezcla (fig. 6).

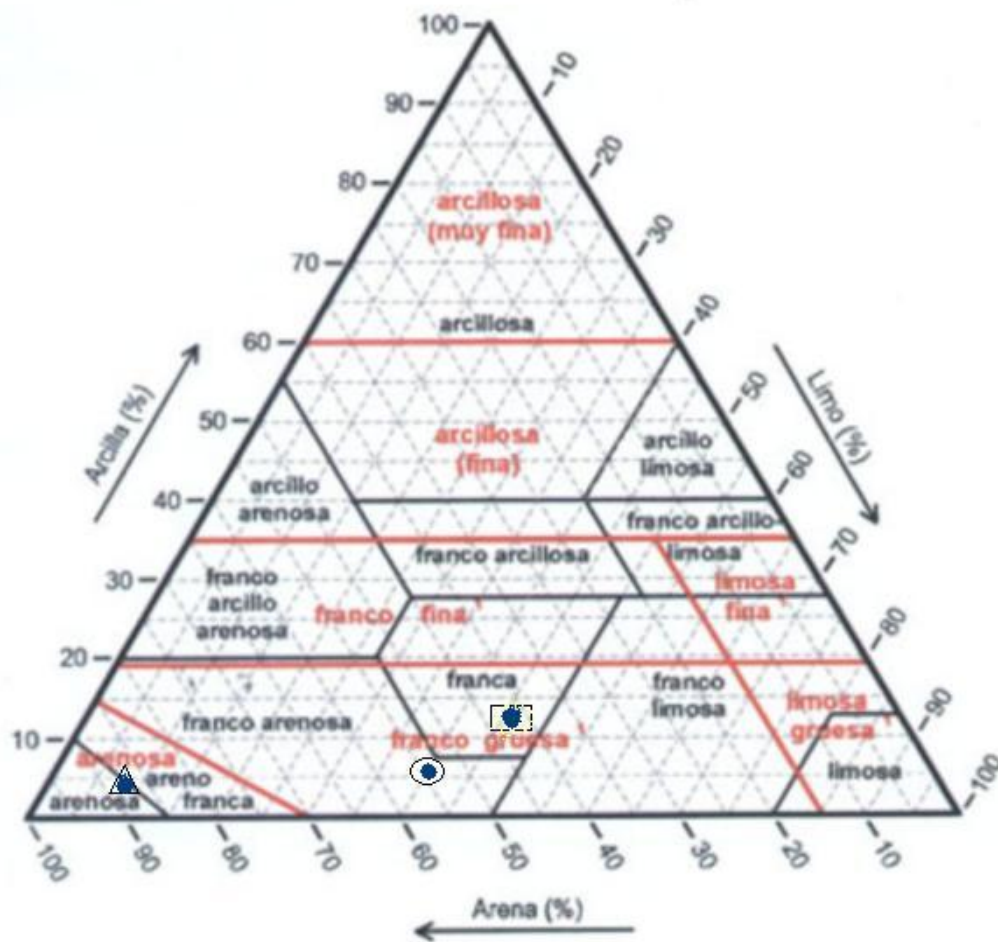


Fig. 6. Textura de los sustratos.

- Lodo
- Mezcla
- △ Suelo de monte

Por lo anterior, se considera que el suelo de monte presenta las mejores condiciones para el desarrollo de la planta y que el lodo es más deficiente, sobre todo en materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico.

Respecto a la disponibilidad de nutrimentos, la cantidad de nitrógeno contenida en el lodo este reducida a aproximadamente la mitad respecto a la del suelo de bosque, esto se debe a que en las aguas y sedimento este nutrimento es inmovilizado por la biomasa microbiana y productores primarios del humedal durante el proceso de biodegradación de los sólidos orgánicos. Como es sabido, este nutrimento esta frecuentemente determinando la dinámica biogeoquímica de los ecosistemas acuáticos y terrestres (Doi *et al.*, 2003; Vander Zanden & Vadeboncoeur, 2002; Vadeboncoeur *et al.*, 2003; He *et al.*, 1997).

El fósforo es relevante en el proceso de respiración y fotosíntesis, así como en la síntesis de grasas, azúcar y proteínas. Su carencia se ve reflejada en un lento crecimiento y desarrollo de la planta (Cajuste, 1977). De acuerdo con la Norma NOM-021-SEMARNAT-2000 valores mayores a 30 mg/kg se consideran elevados por lo que este nutrimento no se considera limitante en ninguno de los tres sustratos.

El potasio se presenta en concentraciones hasta cuatro veces más altas en los suelos del bosque, sin embargo los lodos son pobres en este nutrimento o se encuentran en el límite de concentración más bajo para suelos (Johnson, 1979), sin que esto represente un problema de deficiencia sobre todo de especies forestales como *Pinus cembroides*. Este nutrimento es relevante porque actúa como elemento activo en varios procesos vitales, aumenta la resistencia a enfermedades y fortalece el sistema de enraizamiento. Destaca sus elevados niveles en el suelo de monte. Su presencia en lodos es muy variable, desde los 896 y hasta los 3,283 para el caso de lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (Ortiz-Hernández *et al.*, 1995). Por lo anterior se puede considerar que los lodos estudiados presentan valores bajos.

El nitrógeno es un macronutriente que participa en la formación de las hormonas, los ácidos nucleicos y la clorofila. De acuerdo con la Norma NOM-021-SEMARNAT-2000 los lodos presentan niveles bajos de nitrógeno mineral, en lodo y mezcla (13 y 15.6 mg/kg, respectivamente) y medio, en suelo de monte (28.6 mg/kg).

8.2. Caracterización morfológica de la semilla.

Se evaluaron 50 semillas de *Pinus cembroides*, obteniendo los datos mostrados en el cuadro 5.

Cuadro 5. Características morfológicas de las semillas de *Pinus cembroides*.

Especie	Forma	Largo	Ancho	Color	Textura
<i>Pinus cembroides</i>	Ovalada - subcilíndrica	1.35 cm	0.65 cm	Pardo oscuro	Lisa

Las características de las semillas comprueban lo descrito por Vázquez-Yanes, *et al.* (1999) en el sentido de que son desnudas, subcilíndricas, ligeramente triangulares, sin alas, pardo oscuro o negruzcas, abultadas en la parte superior y adelgazadas hacia la base. Sin embargo, las semillas con las que se trabajó son un poco más largas ya que el mismo autor señala que son de 10 mm de largo y en este caso se encontró que en promedio fueron de 13.5 mm.

La testa o cáscara es leñosa, más o menos gruesa, y está cubierta total o parcialmente por una capa apergaminada o membranosa llamada espermodermo, que puede prolongarse para formar una ala. En las semillas que carecen de ala, como las *Pinus cembroides*, no hay espermodermo, por lo que no pueden dispersarse a través del viento. Esto explicaría la diferenciación genética en los pinos y en particular, en pino piñonero, la baja densidad poblacional, el aislamiento relativo y la dispersión por aves, Delgado *et al.*, (2002). La forma y tamaño de las semillas de *Pinus cembroides* están relacionadas con dispersiones por aves, por gravedad o por efecto de las lluvias. Una vez que se presenta la apertura de los conos, las semillas quedan expuestas a merced de vientos y lluvias que suelen depositarlas en el piso forestal, para formar bancos de semilla en el

suelo. En este estudio se observó que frecuentemente éstas semillas son atacadas por insectos que perforan la cubierta seminal y cuando son ingeridas partes esenciales del embrión como la radícula o el epicótilo convierten a las semillas en inviábiles o bien tienen germinaciones anormales o defectuosas y no hay formación de plántulas. Asimismo, debido a que la cubierta leñosa de las semillas de *Pinus cembroides* es permeable a el agua y gases, no presentan latencia o la presentan en niveles bajos.

8.3. Desarrollo post-emergente.

El número de plántulas emergidas en los almácigos a lo largo de 39 días fue de (17, 16 y 18, en lodo, suelo de monte y mezcla, respectivamente) lo que representa el 68, 64 y 72 por ciento, correspondientemente (fig. 7).



Fig. 7. Ejemplares emergidos en almacigo.

La formación de plántulas en relación con el tiempo y tipo de sustrato se muestra en la fig. 8 y cuadro 6, donde pueden distinguirse tres etapas. Al inicio (los primeros 11 días) hubo poca emergencia con respecto a las 50 semillas colocadas (16, 12 y 20 por ciento, para lodo, suelo de monte y mezcla, respectivamente), en una segunda etapa (de los 12 a los 25 días) se presentó un incremento de plántulas emergidas (56, 60 y 72 por ciento, respectivamente) aunque con mayor variación entre los sustratos, y la última etapa (del día 26 al 40) se estabilizó el desarrollo con porcentajes de 68, 64 y 72 por ciento, para los sustratos señalados.

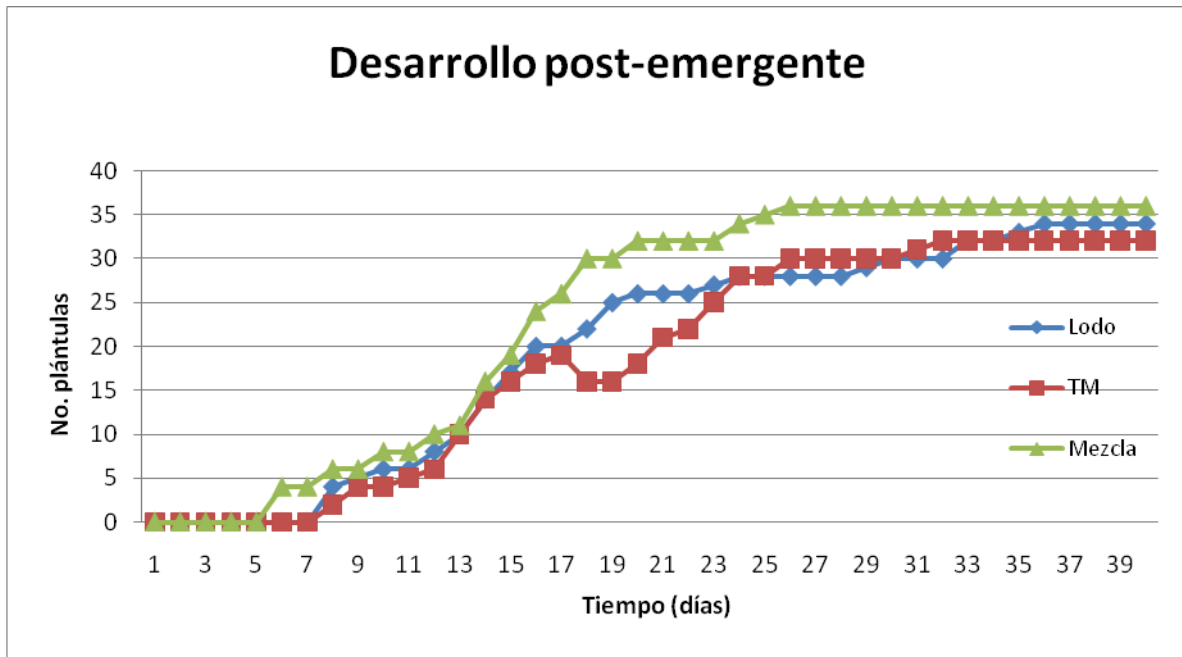


Fig. 8. Desarrollo postemergente de plántulas de *Pinus cembroides*, germinadas en diferentes sustratos.

La respuesta de emergencia se determinó a lo largo de 40 días y se evaluó cuando se notó la elongación del hipocótilo y la caída de la cubierta seminal. Debido a que las semillas empleadas en este estudio procedieron de una población con germoplasma silvestre altamente heterocigótico, se obtuvieron respuestas variadas de emergencia a lo largo del tiempo.

La variada información genética que tienen las poblaciones heterocigóticas (en este caso *Pinus cembroides*) se puede expresar en diversas formas; una de ellas es la respuesta a la emergencia en un intervalo de tiempo amplio como son los 40 días que se emplearon en este estudio. Si estas semillas fueran certificadas o tuvieran algún proceso de domesticación se vuelven homocigóticas y una respuesta que las identificaría o que en general identifica a las semillas certificadas es que tienen una respuesta a la germinación y por consiguiente a la emergencia o desarrollo plantular muy homogéneo. En este caso, todas las semillas germinarían o emergerían en una semana o dos y no se tendrían respuestas variadas de emergencia en el tiempo.

Vázquez-Yanes, *et al.* (1999) registraron que la germinación del *Pinus cembroides* ocurre a los 17 días después de la siembra. En ese lapso, la emergencia en los tres sustratos fue de 72, 68 y 64 por ciento, para mezcla, lodo y suelo de monte, respectivamente. Sin embargo, es necesario considerar que la emergencia medida en este trabajo es un indicio indirecto de la germinación y la viabilidad.

Cetina (1984) señala un 56 por ciento de germinación, mientras que, en este trabajo la emergencia a los 40 días después de la siembra fue de 80 por ciento, y probablemente la germinación fue más alta. Se puede suponer que la germinación es del 100 por ciento, ya que varias de las semillas que germinen pueden no pasar a la siguiente etapa de desarrollo y crecimiento.

Se considera que la semilla del piñonero no tiene problemas para germinar por efecto de su latencia, o debido a las características de su testa, más bien, se deben a factores relacionados con la depredación, debido a su alto contenido de grasas (60 por ciento) y su apetecible sabor. Aunque en este trabajo las condiciones fueron controladas por lo que no se presentó este fenómeno. En general, tanto la germinación de las semillas y al emergencia de las plántulas, tienen un lento incremento, posteriormente, aumenta considerablemente, hasta que se estabiliza.

En este estudio se demuestra que la influencia del sustrato no es particularmente determinante. Esto puede explicarse porque se mantuvo una humedad suficiente que permitió disolver nutrientes contenidos en la materia orgánica y que estos fueran absorbidos por la radícula incipiente. Las diferencias en contenido de materia orgánica en los distintos sustratos no fueron determinantes debido a que en esta fase del desarrollo no se han agotado las reservas nutritivas de los cotiledones de las que todavía depende el desarrollo post-emergente. Las fluctuaciones de temperatura entre 25 a 32°C favorecieron asimismo que las reacciones metabólicas fueran eficientes (cuadro 6).

Si no se hubieran realizado riegos abundantes, los lodos pudieran presentar menor emergencia debido a que por su menor contenido de materia orgánica

presentaría poca retención de humedad y rigidez en el medio, provocando la muerte de la plántula.

La interpretación de los resultados obtenidos se apoya en lo señalado por Gottfried (1986) quien enfatiza el papel de la humedad como el factor más crítico que controla la distribución, composición y densidad en los bosques de piñonero. Por ejemplo, parece que hay una relación directa entre la proporción y la densidad del piñonero en un rodal y las características de humedad del sitio.

Cuando se compara la emergencia obtenida en este trabajo con lo reportado por Celis *et al.* (2006) no existe similitud porque señalan una menor geminación en los urbanos comparado con suelo y biosólidos. Esto puede deberse a la especie, ya que en sus estudios emplearon lechuga y probablemente sea más sensible a factores asociados a los diferentes sustratos, así Hartmann y Kester (1982) han reportado sensibilidad a la sequía y a la luz de la variedad de lechuga "Grand rapids". Un drenaje rápido de un suelo o sustrato conlleva a una condición de sequía que puede ser aprovechada por ciertas especies. Una situación contraria es la retención prolongada de humedad que favorecería otro tipo de especies. Las condiciones de drenaje y retención están relacionadas con el espacio poroso y la textura del suelo. Asimismo la luz que penetra en un suelo depende del espacio poroso y la textura.

8.4. Supervivencia.

En el ciclo biológico del pino el momento más crítico ha sido definido desde la germinación hasta el momento en que las plántulas se consideran establecidas, debido a que en este periodo ocurre el mayor porcentaje de mortalidad. Por lo anterior, si se requiere incrementar la cantidad de regeneración del bosque, deben comprenderse las características básicas del crecimiento de las plántulas, sobre todo en las especies de coníferas donde los índices de mortalidad son altos (Daniel *et al.*, 1982).

De cada almácigo y 40 días después de la siembra, únicamente se trasplantaron a las bolsas de plástico con el sustrato respectivo 19 plántulas (fig. 9).



Fig. 9. Plántulas de *Pinus cembroides* trasplantadas a bolsas de plástico después de 40 días a la siembra.

Se observó una disminución continua de la supervivencia obteniéndose el 46, 56 y 68 por ciento, en suelo de monte, lodo y mezcla, respectivamente (fig. 10). Podría pensarse que en el suelo de monte se encontraría la mejor respuesta,

debido a su mayor contenido de materia orgánica y nutrientes, destaca que la sobrevivencia inicial fue mayor en la mezcla. Sin embargo, la prueba estadística ANOVA señala que dichas diferencias no son significativas (cuadro 7). La varianza en dos componentes (un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos) presenta una razón-F igual a 0.63 (cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos). Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias registradas para los tres sustratos con un nivel de confianza de 95.0 por ciento.

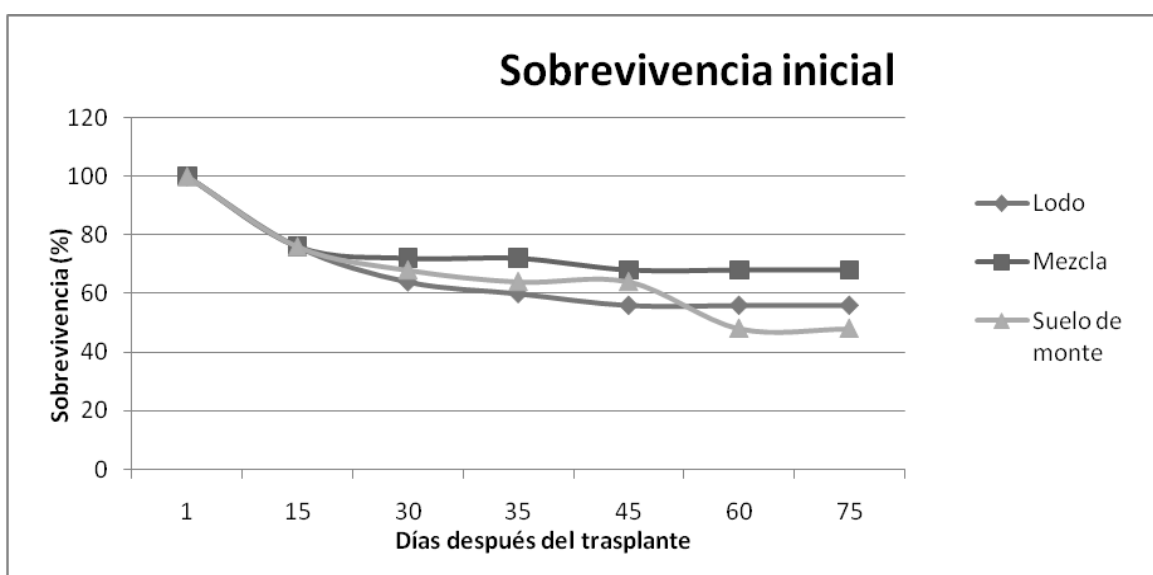


Fig. 10. Sobrevivencia de *Pinus cembroides* en los tres sustratos.

La sobrevivencia obtenida en plántulas de *Pinus cembroides* en este estudio, concuerda con la investigación de Carrillo (1988), quien registra los mayores valores de sobrevivencia en sustratos constituidos con suelo de monte 25 , agrolita 25, cascarilla de arroz 25 y bagazo de caña 25 por ciento, respectivamente para *Pinus montezumae*. Cabe destacar que en estos casos los sustratos alternativos no fueron lodos residuales, sino productos de desechos de materia orgánica.

Cuadro 7. Análisis de varianza para sobrevivencia inicial.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	298.667	2	149.333	0.63	0.5459
Intra grupos	4292.57	18	238.476		
Total (Corr.)	4591.24	20			

Se puede plantear que un porcentaje de sobrevivencia promedio de 56.6% en 75 días que, de acuerdo a la fig. 10, se pueden distinguir dos etapas: La primera, relativamente corta, del día 1 al 20 y la segunda, más larga, del día 21 al 75, siendo que la mayor mortalidad corresponde a la primera. Esto puede deberse a que en este periodo las plantas se vieron afectadas por el trasplante y las nuevas condiciones en la bolsa, además de que la transición de la etapa de germinación a la de plántula es la más vulnerable, es normal que mueran por la alta sensibilidad que tienen las estructuras en desarrollo a las variaciones de humedad, temperatura o sustancias aún no identificadas.

8.5. Altura de las plántulas.

Se observó un comportamiento heterogéneo. En el suelo de monte se obtuvieron los valores mayores de altura del tallo y los más bajos para el lodo, aunque el intervalo de variación de este carácter se traslapa entre los tres sustratos (fig. 11) y el crecimiento de *Pinus cembroides* expresado en altura no depende de la totalidad de características del suelo de monte, aunque éstas influyen en que se desarrolle una mayor talla. En los tres sustratos se presenta un incremento en la altura en relación con el tiempo (fig. 12) y el suelo de monte favorece más ese desarrollo aunque no de forma notable.

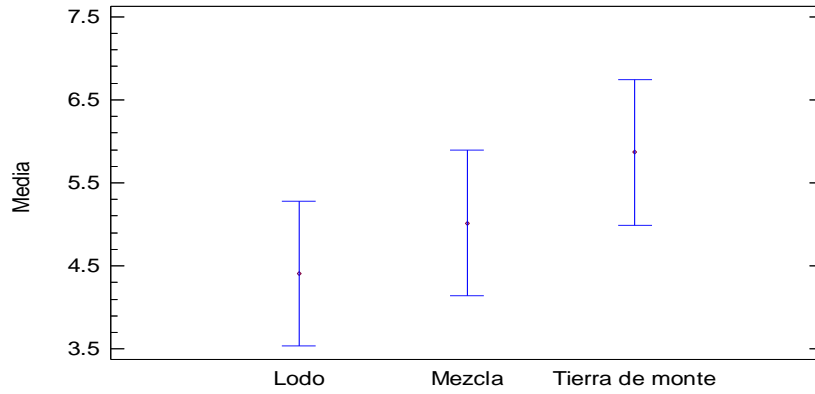


Fig. 11. Diferencia significativa de altura de tallo para los tres sustratos.

En la figura 12 se muestra el incremento altura promedio en los tres sustratos y en las 13, 14 y 15 se muestra la variación en la altura de las plántulas, en los tres diferentes sustratos.

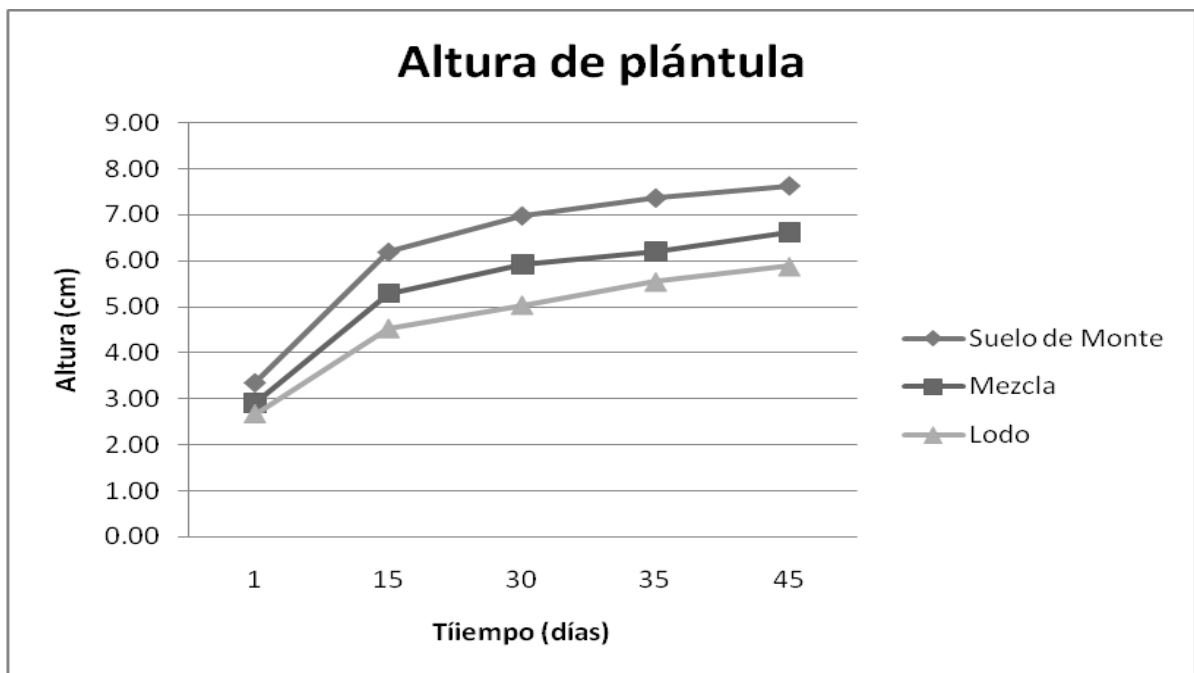


Fig. 12. Incremento de la altura promedio en plántulas de *Pinus cembroides* que crecieron en diferentes sustratos.

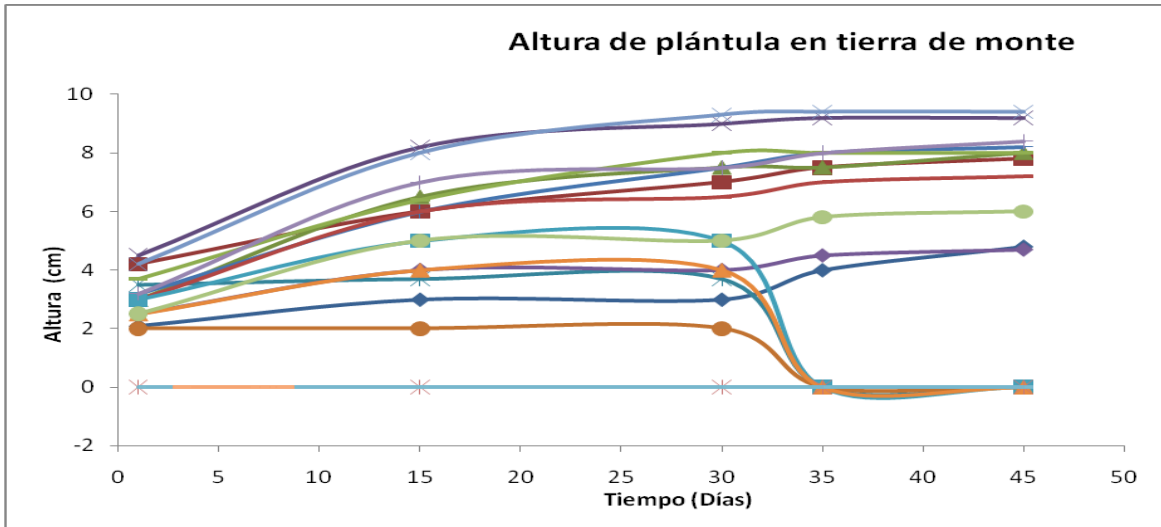


Fig. 13. Variación de la altura de las plántulas en suelo de monte a lo largo del tiempo.

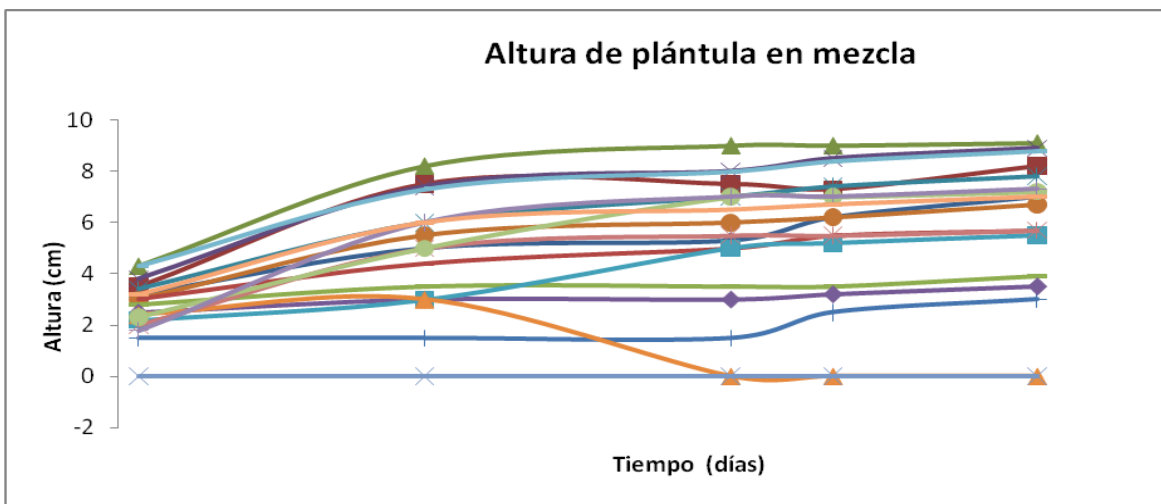


Fig. 14. Crecimiento de las plántulas en mezcla de suelo de monte y lodos.

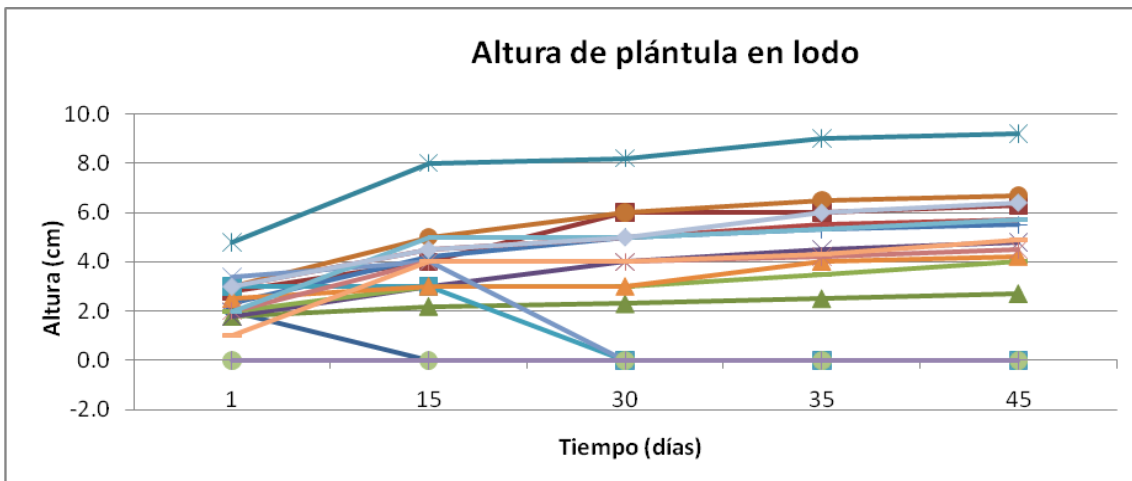


Fig. 15. Crecimiento de las plántulas en lodo.

A pesar de las diferencias aparentes en las gráficas anteriores, donde el suelo de monte presenta un mayor número de plántulas muertas, así como una mayor altura, el análisis ANOVA (cuadro 8) establece que no existe diferencia significativa entre los tres sustratos.

Cuadro 8. Análisis ANOVA para la altura de plántulas de *Pinus cembroides* que crecieron en tres sustratos diferentes.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	7.48301	2	3.7415	1.55	0.2392
Intra grupos	43.4448	18	2.4136		
Total (Corr.)	50.9278	20			

El cuadro anterior, donde se muestra el análisis ANOVA, separa la varianza de los datos en dos componentes: entre grupos y dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 1.55018, es el cociente entre los evaluados entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F, es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia significativa entre las medias de los tres tratamientos con un nivel del 95.0 por ciento de confianza.

Por otro lado, destaca que para la longitud de la raíz, del tallo, de la hoja, así como su biomasa seca, sí existen diferencias estadísticamente significativas (cuadros 9 y 10). En la fig. 16, se muestra de manera comparativa dichos resultados.

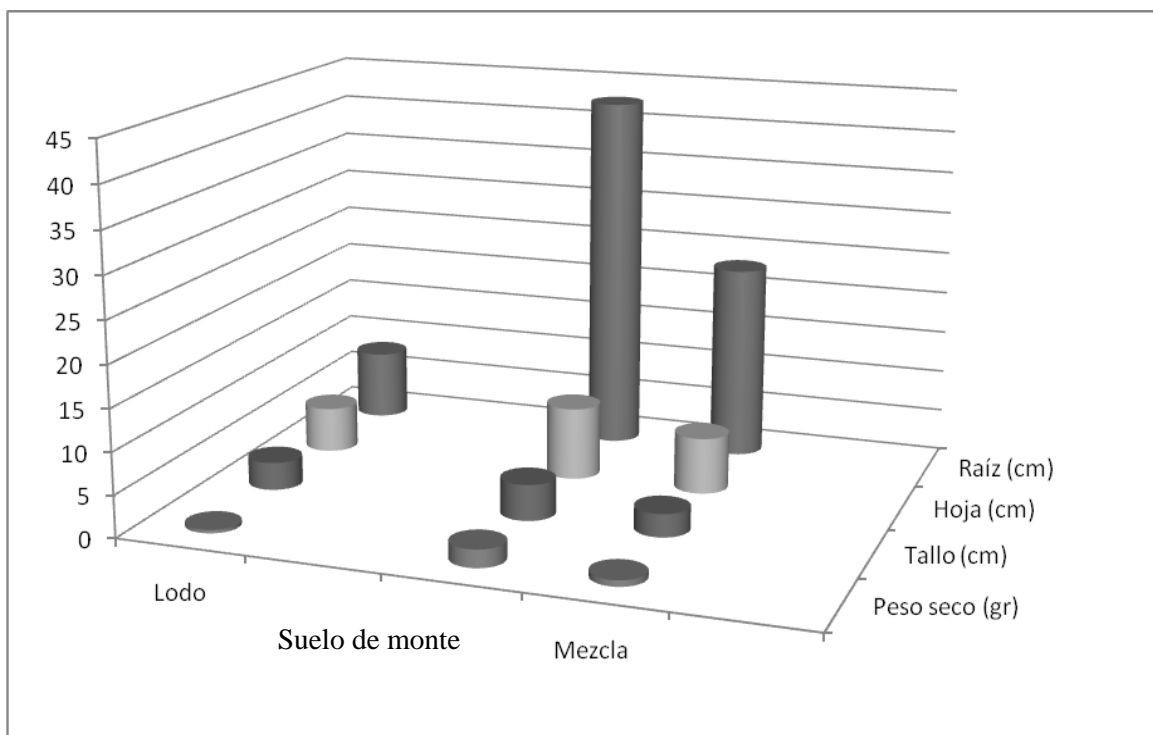


Fig. 16. Longitudes de raíz, tallo y hoja; así como su peso en seco.

Con respecto al tallo destaca un mayor crecimiento en suelo de monte con un promedio de 4.29 cm comparado con lodo y mezcla cuyos promedios fueron de 3.32 cm y 2.75, respectivamente. En el siguiente cuadro se muestra el análisis estadístico.

Cuadro 9. Análisis de varianza para altura de tallo en los tres sustratos.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	15.5425	2	7.77125	7.72	0.0016
Intra grupos	36.2411	36	1.0067		
Total (Corr.)	51.7836	38			

En este caso la razón-F es igual a 7.71955 (cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos), puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95.0 porciento de confianza.

La prueba de rangos múltiples muestra que los tratamientos de mezcla y lodo forman parte del mismo grupo homogéneo, mientras que el suelo de monte pertenece a otro grupo homogéneo (cuadro 10). El mayor crecimiento en el suelo de monte puede deberse a que en este sustrato se presentan las concentraciones mayores de materia orgánica y CIC. La materia orgánica se relaciona con las altas concentraciones de nitrógeno (cuadro 3) que es el principal nutriente responsable del crecimiento temprano y ganancia de biomasa. El pH de 5.05 favorece asimismo la asimilación de nutrientes, necesarios para el crecimiento vegetal, aunque la mezcla de sustratos presenta un pH neutro con un intervalo amplio para la absorción de formas asimilables de nutrientes y la concentración de materia orgánica no representa una limitante, no generó el mayor crecimiento del tallo. Lo anterior puede deberse a que el contenido de nitrógeno está disminuida en prácticamente la mitad en relación con el suelo de monte y los sitios de intercambio para los nutrientes son notablemente menores como lo indica el valor de CIC (cuadro 3), lo cual constituye una limitante para el desarrollo vegetal.

Cuadro 10. Prueba de rangos múltiples para las variables de tipo de sustrato para tallo.

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Mezcla	14	2.75	X
Lodo	13	3.31538	X
Suelo de monte	12	4.29167	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/-</i>
	.		<i>Límites</i>
Lodo - Mezcla		0.565385	0.783763
Lodo - Suelo de monte	*	-0.976282	0.814603
Mezcla - Suelo de monte	*	-1.54167	0.800517

* indica una diferencia significativa.

En la figura 17, se muestran las diferencias en la longitud del tallo de las plántulas de *Pinus cembroides* que crecieron en los tres sustratos.

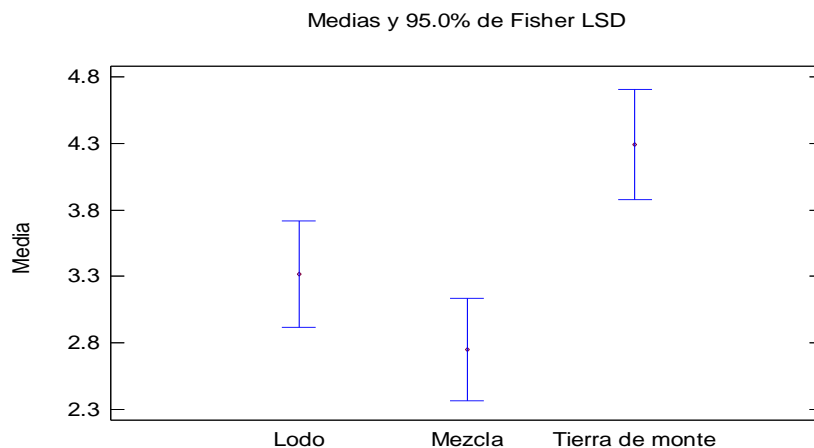


Figura 17. Gráfico de rangos múltiples para longitud del tallo.

8.5. Longitud de hoja.

La mayor longitud de la hoja se presentó en el suelo de monte con un promedio de 8.67 cm y la más corta en el lodo residual, con un promedio de 5.41 cm. De manera similar al crecimiento del tallo, las mejores condiciones para el crecimiento de las hojas fueron en el suelo de monte, ya que las mayores concentraciones de materia orgánica y nitrógeno se encontraron en este tipo de suelo. En el cuadro 11 se muestra el análisis estadístico de este atributo.

Cuadro 11. Análisis de varianza para longitud de hoja en los tres sustratos.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	66.8705	2	33.4353	8.93	0.0007
Intra grupos	134.853	36	3.74592		
Total (Corr.)	201.724	38			

El análisis estadístico ANOVA indica diferencias significativas en la longitud de las hojas en los tres tipos de sustratos ($F=8.9279$; $P= 0.0007$), mostrando que

existe una diferencia significativa entre las medias de los tres tratamientos, con un nivel del 95.0% de confianza.

Cuadro 12. Prueba de rangos múltiples, método: 95.0 porcentaje LSD para hoja

	<i>Caso</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
	<i>s</i>		
Lodo	13	5.40769	X
Mezcla	14	6.71429	X
Suelo de monte	12	8.66667	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Lodo - Mezcla		-1.30659	1.51187
Lodo - Suelo de monte	*	-3.25897	1.57136
Mezcla - Suelo de monte	*	-1.95238	1.54419

* Indica una diferencia significativa.

La comparación múltiple de las medias en los tres tratamientos es significativamente diferente (cuadro 12). El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que éstos muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0 por ciento de confianza. No existen diferencias estadísticamente significativas dentro de sustrato. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0 por ciento al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

8.6. Biomasa seca.

En el cuadro 13, se muestran los estadísticos para probar diferencias significativas entre las medias de las columnas para la biomasa seca. El cuadro 14 exhibe los componentes entre-grupos y dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 44.891, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia significativa entre las medias de los tres tratamientos, con un nivel del 95.0% de confianza. Asimismo, Los resultados de la prueba de rangos múltiples con el método: 95.0 porcentaje LSD se muestra en los siguientes 15 y 16.

Cuadro 13. Diferencias entre las medias para biomasa seca, de plántulas de *Pinus cembroides* cultivadas en tres sustratos diferentes.

	<i>Recuento</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coficiente de Variación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Rango</i>
Lodo	13	0.3984	0.23391	58.7034porciento	0.06	0.82	0.76
Mezcla	14	0.7271	0.40334	55.4692porciento	0.04	1.24	1.2
Suelo de monte	12	2.115	0.706045	33.3828porciento	0.71	3.13	2.42
Total	39	1.0446	0.871212	83.4002porciento	0.04	3.13	3.09

Cuadro 14. Componentes entre y dentro de grupos para peso seco.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	20.5874	2	10.2937	44.89	0.0000
Intra grupos	8.25495	3	0.229304		
Total (Corr.)	28.8424	3			

Los resultados de la prueba de rangos múltiples con el método: 95.0 porcentaje LSD se muestra en los siguientes cuadros (15 y 16):

Cuadros 15. Pruebas de rangos múltiples para peso seco (medias).

	<i>Caso</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos</i>
	<i>s</i>		<i>Homogéneos</i>
Lodo	13	0.3984	X
		62	
Mezcla	14	0.7271	X
		43	
Suelo de monte	12	2.115	X

Cuadros 16. Pruebas de rangos múltiples para peso seco (diferencias significativas).

<i>Contraste</i>	<i>Sig</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Lodo - Mezcla	.	-	0.37406
		0.328681	
Lodo - Suelo de monte	*	-1.71654	0.388779
Mezcla - Suelo de monte	*	-1.38786	0.382056

* indica una diferencia significativa.

En cuadro anterior se observa la comparación múltiple de las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los dos pares, indica que éstos muestran diferencias significativas con un nivel del 95.0% de confianza. No existen diferencias significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa

(LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0 por ciento, cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. En la figura 18 se indica que el sustrato suelo de monte, registró la mayor biomasa seca de los tres sustratos utilizados.

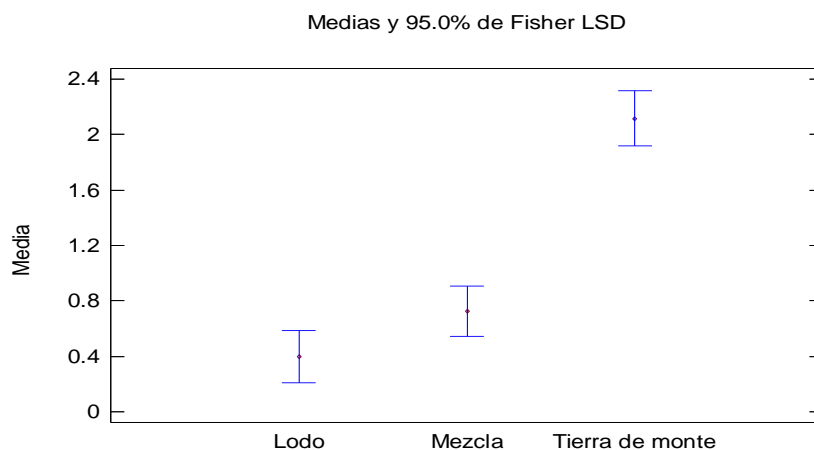


Figura 18. Comparación de medias de peso seco en los tres sustratos.

En la figura 18 se indica que en el sustrato suelo de monte se tiene el mayor peso seco, comparado con lodo y mezcla.

8.7. Longitud de la raíz.

En el cuadro 17 se observa el análisis estadístico para la longitud de la raíz.

Cuadro 17. Componentes entre-grupos y dentro-de-grupos para longitud de raíz en plántulas de *Pinus cembroides* cultivadas en tres sustratos diferentes.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	7448.41	2	3724.21	55.31	0.0000
Intra grupos	2424.06	3	67.335		
Total	9872.47	3			
(Corr.)		8			

Los cuadros 18 y 19 contienen el ANOVA que descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 55.3086, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F, es menor que 0.05, existe una diferencia significativa entre las medias de los tres tratamientos, con un nivel del 95.0% de confianza.

Cuadros 18. Pruebas de rangos múltiples para raíz. Método: 95.0 porcentaje LSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Lodo	13	8.25385	X
Mezcla	14	23.2143	X
Suelo de monte	12	42.75	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Lodo - Mezcla	*	-14.9604	6.40996
Lodo - Suelo de monte	*	-34.4962	6.66219
Mezcla - Suelo de monte	*	-19.5357	6.54699

* indica una diferencia significativa.

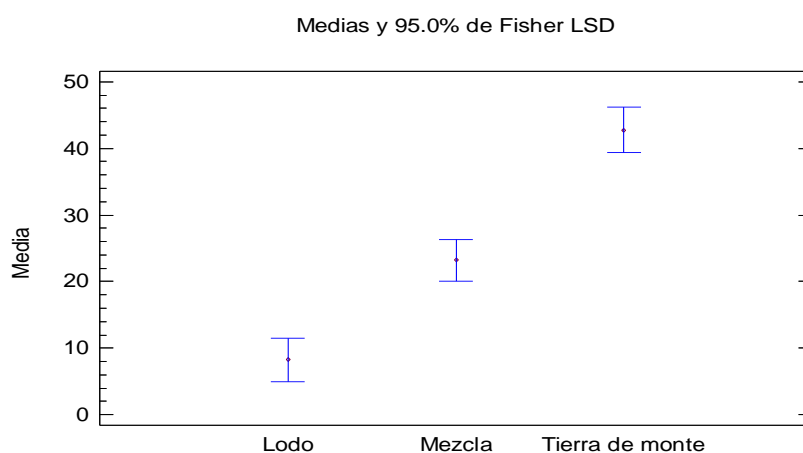


Figura 19. Medias y 95% de Fisher LSD de raíz de las plántulas de *Pinus cembroides*, cultivadas entre sustratos diferentes.

A continuación se presentan un cuadro comparativo de las longitudes y peso en los tres tratamientos:

Cuadro 19. Peso seco y longitud de raíz, tallo y hojas de las plántulas.

	Raíz (cm)	por ciento	Tallo (cm)	por ciento	Hoja (cm)	por ciento	Peso seco (gr)	por ciento
Lodo	8.25	19	3.32	77	5.41	62	0.40	18
Suelo de monte	42.75	100	4.29	100	8.67	100	2.12	100
Mezcla	23.21	54	2.75	64	6.71	77	0.73	34

El desarrollo radical con mayor longitud se presentó en el suelo de monte. El promedio de la longitud de las raíces es de prácticamente el doble del desarrollo radical alcanzado por la mezcla de sustratos y cinco veces más que el del sustrato del lodo residual. El mismo patrón de grandes diferencias se presenta con la biomasa (cuadro 20). Asimismo las mayores longitudes en tallo y hoja se

observaron en el suelo de monte, aunque las diferencias en longitud en estas estructuras son pequeñas comparativamente.

En todos los casos se presentó un menor desarrollo en los lodos, siendo de mayor magnitud en raíz y biomasa seca. Esto puede atribuirse a que en este sustrato se tienen los menores niveles en nutrimentos, además de que el pH de 8.45 está por arriba de lo recomendado para *Pinus cembroides* (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). El pH modifica la solubilidad de los minerales, de forma que algunos nutrimentos pueden no estar disponibles para los vegetales. Además, el pH de 5.05 del suelo del monte permite que una cantidad importante de minerales permanezcan solubles en el agua edáfica y sean absorbidos por el sistema radical. Este pH ácido puede tener pocas variaciones debido al efecto amortiguador de la CIC que es muy alta en el suelo de monte (107.06) y muy baja en el sustrato lodo (8.7). Asimismo los suelos con textura franca amortiguan mejor los cambios de pH en comparación con los suelos de textura arenosa como el encontrado en la mezcla de sustratos. El escaso crecimiento de la raíz en el sustrato lodo también pudo deberse a la absorción de elementos fitotóxicos que degradan el desarrollo del sistema radical.

De acuerdo a Taiz y Zeiger (2006), el crecimiento de las raíces es favorecido en suelos ligeramente ácidos con valores de pH entre 5.5 y 6.5, lo que concuerda con nuestros resultados, ya que las longitudes más pequeñas corresponden a un pH alcalino.

Este estudio contrasta con los resultados obtenidos en plántulas de jitomate (*Lycopersicon esculentum*) en donde se obtuvieron resultados positivos con la aplicación de lodos ya que hubo un incremento tanto en altura, tallo y raíz como en el diámetro de la planta y masa seca foliar y éste crecimiento fue muy similar al suelo fertilizado mineralmente (Borges *et al.* 2007). Además, la densidad fue menor en el suelo de monte. Es posible que la textura no haya sido un factor determinante debido que son similares en los tres sustratos (franco-franco arenoso).

Para interpretar estos resultados, Altamirano y Aparicio-Rentería (2002) señalan que la sobrevivencia y crecimiento de las plántulas depende de diversos factores, entre ellos, la fertilidad y humedad del suelo, pues el suministro inicial de alimento proviene de la semilla, y posteriormente se requieren cantidades adecuadas de agua, nutrimentos, minerales, oxígeno, bióxido de carbono, hormonas y una temperatura favorable para el crecimiento. El suelo de monte proveyó las condiciones antes descritas de mejor manera, es decir, que las diferencias encontradas en cuanto a nitrógeno, potasio, fósforo, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico, determinaron un mejor crecimiento de la plántula, en cuanto a la longitud de la raíz, altura de plántula y longitud de la hoja. Sin embargo, la diferencia encontrada en los tres sustratos para el crecimiento de la raíz, puede deberse a la mayor densidad que se registró en el lodo, y la mezcla impidió el crecimiento radicular, ya que los tres presentaron textura muy similar. Otra posible razón puede atribuirse a diferencias en la capacidad de intercambio ya que influye de manera directa en la disponibilidad de los nutrimentos para ser absorbidos por las plántulas.

Experiencias desarrolladas por Wu y Martínez (2000), demostraron que la germinación de semillas de tomate disminuyó en un 33 a 55 por ciento, cuando el volumen de lodo aumentó en sustratos mezclados. Durante el período de germinación ocurren numerosos procesos fisiológicos en los que la presencia de elementos fitotóxicos, como Cu, Ni o Zn (Shober y Sims, 2003), puede interferir alterando la viabilidad de la semilla y el desarrollo normal de las plántulas (Sobrero y Ronco, 2004). Las semillas de lechuga (*Lactuca sativa.*) son particularmente sensibles para estos bioensayos (Sobrero y Ronco, 2004). *L. sativa* es una especie indicadora del efecto de compuestos tóxicos y una buena acumuladora de metales pesados en sus tejidos (Schmidt, 1997).

Los lodos residuales presentan un gran contenido de nutrimentos como el nitrógeno y cationes base como el sodio, el potasio, el calcio y el magnesio. Sin embargo, el pH del suelo de grandes zonas forestales puede acidificarse con la consecuente disminución de cationes básicos por lo que necesitan un suministro adicional de nutrimentos así como también la adición de sustancias

amortiguadoras. Una gran porción de los nutrientes presentes en los lodos están enlazados con la materia orgánica de tal manera que están disponibles de manera gradual durante la mineralización. La materia orgánica también puede mejorar la capacidad para mantener el agua y los nutrientes.

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con respecto a la hipótesis planteada, puede señalarse que los lodos residuales provenientes del humedal localizado en la comunidad de Julián Villagrán, no son ricos en materia orgánica. Sobre todo si se compara con el suelo de monte. Sin embargo, esta diferencia no influyó de manera determinante en el crecimiento, debido a que sólo mostraron diferencias significativas la longitud de la raíz y la biomasa seca, mientras que no las hubo en la altura de las plántulas y la longitud de la hoja.

El número de plántulas emergidas entre los tres sustratos fue variable en el transcurso del tiempo, pero al final del periodo alcanzaron porcentajes similares. Esto se atribuye a la variabilidad genética del germoplasma empleado, ya que se obtuvo de un rodal silvestre. Se concluye que el tipo de sustrato no determina diferencias en cuanto al desarrollo post emergente.

Tampoco hubo diferencia entre sustratos para el caso de la sobrevivencia inicial, siendo el caso contrario para longitud de raíz, tallo, hoja y peso seco. En estos tres últimos casos, no hubo diferencia entre lodo y mezcla, destacando los valores más altos en suelo de monte.

Destaca el caso de la longitud de raíz porque se presentaron diferencias tanto en lodo como en suelo de monte y mezcla, teniéndose el mejor desarrollo en suelo de monte.

El lodo puede ser empleado como sustrato alternativo en la germinación, el desarrollo post emergente y la supervivencia de plántulas, pero no se recomienda para las etapas posteriores, pues se corre el riesgo de limitar el crecimiento, particularmente de raíces y biomasa seca.

X. LITERATURA CITADA

Altamirano, Q.M.T. y A. Aparicio-Rentería. 2002. Efecto de la lombricomposta como sustrato alternativo en la germinación y sobrevivencia inicial de *Pinus oaxacana* Mirov y *Pinus rudis* Endol. *Foresta Veracruzana* 4(1): 35-40.

Álvarez, E.A., M. C. Monchon J. C. J. Sánchez y M. T. Rodríguez. 2002. Heavy metals extractable form in sludge from wastewater treatment plants. *Chemosphere* 47:765-806.

American Society of Agronomy. 1979. *Methods of soil analysis part I. chemical and microbiological properties*. Fifth Printing. USA.

Azevedo, M. L., L. R. Ferraciu y L. R. Guimaraes. 2003. Biosolids and heavy metals in solids. *Science Agriculture* 60:793-806.

Bastian, R.K. 1986. *Overview on sludge utilization*. En: D.W. Cole, C.L. Henry and W. Nutter (Editors), *The Forest Alternative for Treatment and Utilization of Municipal and Industrial Wastewater and Sludge*. University of Washington Press, Seattle, WA, pp. 25.

Batis, A.I., M.I. Alcocer, M. Gual, C. Sánchez y C. Vázquez-Yáñez. 1999. Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Instituto de Ecología, UNAM- CONABIO, México D.F.

Belmont, M.A., E. Cantellano, S. Thompson, M. Williamson, A. Sánchez and C.D. Metcalfe. 2004. Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central Mexico. *Ecological Engineering* 23: 299-311.

Benfield, L.D. y C.W. Randall. 1980. Biological process design for wastewater treatment. Prentice - Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J.

Bewley J.D., y M. Black. 1994. *Seeds: Physiology of Development and Germination*. New York. Plenum. 367 pp.

Bewley, J. D. 1997. Seed Germination and Dormancy. *The Plant cell* 9:1055-1066.

- Borges, E.U., I.M. R. Escobar, J.A. Cabrera, E.C. Ramos y A.C. Miranda. 2007. Aplicación de biosólidos en el cultivo de plántulas de tomate. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 16(1): 65-69.
- Cajuste, L. J. 1977. Química de suelos con un enfoque agrícola. Colegio de Posgraduados. Chapingo. México.
- Camacho-Morfín, F. 1994. *Fisiología de la germinación*. En: *Semillas Forestales*. INIFAP. Pub. Esp. No. 2. Coyoacán, D.F. México. pp. 12-31.
- Carrillo, T.L.A. 1988. *Efecto de la mezcla de sustratos en la germinación y sobrevivencia inicial de tres especies de pino en el vivero de Nezahualcoyotl*. Tesis de licenciatura. Chapingo. México. 80 p.
- Celis, J., M. Sandoval, E. Zagal y M. Briones. 2006. Efecto de la adición de biosólidos urbanos y de salmonicultura sobre la germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa L.*) en un suelo patagónico. *Journal of Soil Science Plant Nutrition* 6(3): 13-25.
- Cetina, A. V. M. 1984. Estudios sobre la germinación de *Pinus cembroides* Zucc. en condiciones naturales. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Posgraduados. Chapingo, Edo de México. 126 p.
- Chang A.C., A.L. Page y T. Asano. 1995. *Developing Human Health-Related Chemical Guidelines for Reclaimed Wastewater and Sewage Sludge Applications in Agriculture*, World Health Organization, Geneva.
- CONAGUA. 2009. Atlas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Copeland, L. O. 1976. Principles of seed science and technology. Burgess Publishing. Michigan State University. Minnesota, USA. 369 pp.
- Daniel, T.W., Helms, J.A. y F.S. Baker. 1982. *Principios de Silvicultura*. México. McGraw-Hill, Inc. México. D.F.
- Dégremont. 1980. *Manual técnico del agua*, Bilbao. pp 105-473, 749-781.

Delgado, P, A. Cuenca, A.E. Escalante, F. Molina-Freaner y D. Piñero. 2002. Comparative genetic structure in pines: evolutionary and conservation consequences. *Revista Chilena de Historia Natural* **75**: 27-37.

Doi, H., E. Kikuchi, S. Hino, T. Itoh, S. Takagi y S. Shikano. 2003. Seasonal dynamics of carbon stable isotope ratios of particulate organic matter and benthic diatoms in strongly acidic Lake Katanuma. *Aquatic Microbial Ecology* **33**: 87-94.

Edmonds, R.L. 1976. Survival of coliform bacteria in sewage sludge applied to a forest clearcut and potential movement into groundwater. *Applied Environmental Microbiology* **32**:537-546.

Elliot, H.A y B.A. Demsey. 1991. Agronomic effects of land application of water treatment sludges. *Journal of the American Water Works Association* **83**(4):123-131.

Fernández, R. A. 1986. Caracterización del vivero volante forestal localizado en la comunidad de Santiago Tula, Oaxaca, con fines industriales. Tesis de licenciatura. UNAM. Cuautitlan Izcalli, Estado de México.

Fitzpatrick, E. A. 1996. Introducción a la ciencia de los suelos. Editorial Trillas. México, D. F.

Fytianos, K., y E. Charantoni. 1998. Leaching of heavy metals from municipal sewage sludge. *Environmental International* **24**(4): 467-475.

GOEDOMEX. 2006. Norma Técnica Estatal y Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006 que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos. Gobierno del Estado Libre y Soberano de México. Gaceta de Gobierno del Estado de México. Toluca de lerdo. Estado de México.

González, E., M.A. Tornero, Y. Cruz y L.N. Bonilla. 2009. Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. *Rev. Internacional de Contaminación Ambiental* **25**(1): 15-22.

González, Q. L. 1968 *Tipos de vegetación del Valle del Mezquital, Hidalgo*. Departamento de Prehistoria. INAH, México. 53 pp.

Gottfried, G. J. 1986. Regeneration of pinyon. Paper presented at the pinyon-juniper conference, Renu, January 13-16.

Hammer, D. A. y R. K. Bastian. 1989. Wetlands ecosystems: natural water purifiers. Chapter 2. En: Hammer, D. A. (ed.) *Constructed wetland for wastewater treatment*. Lewis Publishers, Chelsea, MI.

Hartmann, H. T. y D. E. Kester. 1984. Propagación de Plantas principios y prácticas. Editorial Continental. 797 pp.

Hawley, R. C. y D. M. Smith. 1982. *Silvicultura Practica*. Ediciones Omega S.A. Barcelona.

He Z. L., H. Yao, G. Chen, J. Zhu y C. Huang. 1997. Relationship of crop yield to microbial biomass in highly weathered soil of China. In: Ando T. *et al.* _eds_, *Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 751–752.

Henry, C. L. 1989. Evaluation of comments on the proposed standards for management of sewage sludge: Non-agricultural land application. U.S. EPA-NNEMS Publication.

Hernández, M. A. 1992. *Depuración de aguas residuales*. Servicio de publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, España, p. 713.

Hue N.V., J. A. Silva y R. Arifin. 1988. Sewage sludge soil interactions as measured by plant and soil chemical composition. *Journal of Environmental Quality* **17**:384-390.

INEGI. 1992. *Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo*. México, D.F.

Jackson, L.M. 1970. *Análisis químico de suelos*. Ed. Omega. Barcelona.

Johnson L. J. 1979. Introductory soil science a study guide and laboratory manual. McMillan Publishing Co., Inc. New York, USA.

Kirkham, M. B. 1974. Disposal of sludge on land. Effect on soils, plant and ground water. *Compos. Sci.* 15:6-10.

López, R. G. 2005. *Ecofisiología de árboles*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 484 pp.

Lynam, B. T., B. Sosewitz y T. D. Hinesly. 1972. Liquid fertilizer to reclaim land and produce crops. *Water research* 6:545-549.

Mazzarino, M., I. Walter, G. Costa, F. Laos, L. Roselli, P. Satti. 1997. Plant response to fish farming wastes in volcanic soils. *Journal of Environmental Quality* 26: 522-528.

Moeller, G. 1997. *Biological Treatment of Municipal Sludge. Biotechnology for Water Use and Conservation*. The Mexico 96 Workshop. OECD, Cedex, París, Francia.

Montes G. R., H. S. Jiménez, S. G. Solis. 2004. Lodos residuales composteados; una alternativa de sustrato para la producción de planta de *Agave durangensis*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 10(1): 21-24.

Musalem, M. A. 1984. Effect of environmental factors on regeneration of *Pinus montezumae* Lamb., in a temperate forest of Mexico. Yale University. New Haven. Ct. 244 pp.

Niembro, R. A y G. A. M. Fierros. 1990. *Factores ambientales que controlan la germinación de pinos*. En: *Mejoramiento genético y plantaciones forestales*. Centro de Genética Forestal, A.C. Chapingo, Estado de México. p 124-144.

Oberhaster, G. 1991. South Africa practice in land disposal of sludge, including legislation and health aspects. *Water Science Technology* 15:151-155.

Oliver, S. R. 1981. *Ecología y Subdesarrollo en America Latina*. Siglo XXI. México, D.F. 225 pp.

Ortiz Villanueva, B y C. A. Ortiz-Solorio. 1990. Edafología. Séptima edición. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Estado de México.

Ortiz-Hernández, Ma. L., M. E. Gutiérrez-Ruiz y E. Sánchez-Salinas. 1995. Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* **11**(2): 105-115.

Page, A. L. y A. C. Chang. 1994. *Overview of the past 25 years; Technical perspective*. P. 3-6. En: C.E. Clapp *et al.* (ed.). *Sewage sludge; land Utilization and the Environment*. ASA, CSSA & SSSA, Madison, WI.

Pérez B. J. 1988. Estimación de la producción de conos de *Pinus montezumae* Lamb., en CEF San Juan Tetla, Pue. Tesis de licenciatura, D.C.F. UACH. Chapingo, Estado de México.

Perry J. P. Jr. 1991. *The Pines of Mexico and Central America*. Portland, Oregon. Timber. 231 pp.

Petruzelli, G. 1989. Recycling wastes in agriculture: heavy metal bioavailability. *Agricultural Ecosystems Environmental* **27**: 493-503.

Rebolledo, V. A. 1982. Estudio preliminar sobre la ecología de los piñoneros en el altiplano Potosino-Zacatecano. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México. 123 pp.

Robert, M. F. 1977. Notas sobre el estudio ecológico y fitogeográfico de los bosques de *Pinus Cembroides* Zucc. en México. *Ciencia Forestal* **2**:30-40.

SARH. 1985. III Reunión forestal sobre plantaciones forestales. Pub. Esp. No. 48. México.

Schmidt, J. P. 1997. Understanding phytotoxicity thresholds for trace elements in land-applied sewage sludge. *Journal of Environmental Quality* **26**:4-10.

SECOFI. 1985. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-15. Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-muestreo-método de cuarteo. Secretaria de comercio y fomento industrial. Diario oficial de la Federación. México, D.F.

SEMARNAT. 1993. Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-93. Características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Secretaria del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario oficial de la federación.

SEMARNAT. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-004-2002-SEMARNAT. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Shober, A. L. y J. T. Sims. 2003. Phosphorus restrictions of land application of biosólidos: current status and future trends. *Journal of Environmental Quality* 32:1955-1964.

Sobrero, M. C. y A. Ronco. 2004. *Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga (Lactuca sativa L.)*. p: 71-79. En: G. Castillo (ed). *Ensayos Toxicológicos y Métodos de Evaluación de Calidad de Aguas*. Ottawa.

Taiz, L. y E. Zeiger. 2006. *Fisiología vegetal*. Universitat Jaume. Los Angeles.

Tierney, J. T., R. Sullivan y E. P. Larkin. 1977. Persistence of Poliovirus in solid and on vegetables in solid previously flooded with inoculated sewage sludge or effluent. *Applied Environmental Microbiology*. **33**:99-113.

Uiga A. y R. W. Crites 1980. Relative Health Risks of Activated Sludge Treatment and Slowrate Land Treatment. *Journal Water Pollut. Contr. Fed.* 52, 2865-2874.

Utria, B., Reynaldo, E., Cabrera, A., Ramos, C., Miranda, C. 2007. Aplicación de Biosólidos en el cultivo de plántulas de tomate. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Universidad Agrarias de LA Habana* **16**: 65-69.

Vázquez-Yanes, C., A. I. Batis Muñoz, M. I. Alcocer Silva, M. Gual Díaz y C. Sánchez Dirzo. 1999. *Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO-Instituto de Ecología, UNAM. México, D.F.

Vadeboncoeur, Y., E. Jeppesen, M. J. Vander Zanden, H. Schierup, K. Christoffersen y D. M. Lodge, 2003. From Greenland to green lakes: Cultural eutrophication and the loss of benthic pathways in lakes. *Limnology and Oceanography* **48**: 1408–1418.

Vander Zanden, M. J. y Y. Vadeboncoeur. 2002. Fishes as integrators of benthic and pelagic food webs in lakes. *Ecology* **83**: 2152–2161.

Weetman, G. F., M. A. McDonald, C. E. Prescott y J. P. Kimmins. 1993. Responses of western hemlock, Pacific silver fir, and western red cedar plantations on Northern Vancouver island to application of sewage sludge and inorganic fertilizer. *Canadian Journal Forest Research* **23**:1815-1820.

Wu, L., L. Ma y G. Martinez. 2000. Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost. *Journal of Environmental Quality* **29**: 424-429