



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**FITOEXTRACCIÓN DE Na⁺ EN SUELOS EN
PROCESO DE SODIFICACIÓN, POR MEDIO DE
*Amaranthus hypochondriacus***

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
BIÓLOGO**

Presenta:

ESAÚ GARCÍA ROMERO

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ESTHER MATIANA GARCÍA AMADOR

Financiado por el proyecto PAPIME – PE201311

Noviembre del 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Índice General

Índice general	i
Índice de figuras	ii
Índice de figuras del anexo	iii
Índice gráficas	iv
Índice de cuadros	v
Dedicatoria	vi
Agradecimientos	vii
Resumen	viii
Introducción	1
Marco Teórico	3
1. Generalidades sobre nutrición de las plantas	3
2. Sodio	4
3. Acumulación de sodio en los suelos	5
3.1 Procesos de formación de suelos con altos contenidos de sales	5
3.1.1 Procesos naturales de formación de suelos con alto contenido de sales	6
3.1.2 Procesos inducidos de formación de suelos con alto contenido de sales	7
3.1.2.1 Proceso inducido por las aguas con altas concentraciones de sodio	7
3.1.2.1.1 Manejo de riego con aguas residuales	8
3.1.2.1.2 Riego de sodicidad	9
3.1.2.1.3 Índice RAS (Relación de absorción de sodio)	9
3.1.2.1.4 Normatividad de las aguas residuales para uso agrícola	9
3.2 Proceso de salinización y sodificación	10
3.2.1 Factores que favorecen el proceso de salinización y sodificación	10
4. Sodio en el suelo	11
4.1 Clasificación de los suelos con base a la salinidad y sodicidad	11
4.2 Contenido y dinámica del sodio en el suelo	12
4.3 Efectos del sodio en el suelo	13
5. Sodio en las plantas	14
5.1 Esencialidad del sodio en las plantas	14
5.2 Sodio en el metabolismo de las plantas C4	15
5.3 Mecanismos de ingreso de sodio a la planta	16
5.4 Concentraciones en los tejidos vegetales	17
5.5 Efectos del sodio en el desarrollo de las plantas	17
5.5.1 Salinidad y germinación	18
5.6 Adaptación y resistencia de las plantas a la salinidad	19
5.7 Uso de plantas tolerantes	20
5.8 Uso de plantas tolerantes a las condiciones provocadas en el suelo por el sodio intercambiable	20
6. Fitorremediación	21
7. Biología de la especie: <i>A. Hypochondriacus</i>	22
7.1 Generalidades de <i>A. Hypochondriacus</i>	22
7.2 Características biológicas	23
7.2 Ciclo de vida y fenología	23
7.3 Condiciones de cultivo y cosecha	25
Justificación	25
Problemática	25
Hipótesis	26
Objetivos generales	26
Objetivos particulares	26
Diseño experimental	27
Metodología	28
Resultados	37
Discusión de resultados	50
Conclusiones	67
Bibliografía	69
Anexo	74
Análisis estadístico	77

Índice de figuras

Figura 1. Secuencia de reacciones en la fotosíntesis de las plantas C4 y participación del sodio	15
Figura 2. Representación esquemática de la acumulación vacuolar de sodio	20
Figura 3 Fotografía de <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	22
Figura 4 Fotografía del plantío de <i>A. hypochondriacus</i> ubicado en el municipio de Amecameca, Edo. de México.	29
Figura 5 Fotografía del establecimiento del cultivo en bloques bajo condiciones de invernadero	30
Figura 6 Fotografía (A): Siembra directa, germinación de semillas de <i>A. hypochondriacus</i> sobre las macetas del bloque 3, 4 y 5. Fotografía (B): Siembra indirecta, trasplante de plántulas de <i>A. hypochondriacus</i> sobre las macetas del bloque 1, 2 y 6	31
Figura 7 Fotografía de la germinación de las semillas de <i>A. hypochondriacus</i> en 0, 1, 4, 6.6, 9.6, 12 dS \cdot $l^{-1}m$ en incubadora a 25°C	32
Figura 8 Fotografías de la toma del diámetro y la altura (fotografía A) y del peso (fotografía B) de cada uno de los individuos por bloque, para construir el índice de biomasa	32
Figura 9 Fotografías que muestran los seis registros del desarrollo de <i>A. hypochondriacus</i> en las semanas 1,4, 7, 9, 11 y 13	33
Figura 10 Fotografía de la espiga de <i>A. hypochondriacus</i> , que indica el límite de establecimiento y de cosecha	34
Figura 11 Fotografía que muestra el espectrofotómetro de absorción atómica donde se realizó el análisis de la concentración de sodio en suelo y del material vegetal de <i>A. hypochondriacus</i> .	35
Figura 12 Fotografía que muestra la previa toma de la muestra compuesta por bloque de los suelos de cada maceta depositados en bolsas de poliuretano	35
Figura 13. Fotografías que muestran el progreso de las fases fenológicas de <i>A. hypochondriacus</i> .	53

Índice de figuras del anexo

Figura 1. Clases de salinidad de agua para riego	74
Figura 2. Diagrama que muestra el diseño experimental del cultivo desde su establecimiento hasta la madures fisiológica de <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	75
Figura 3 Distribución de las macetas en los bloques del plantío de <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	76

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Porcentaje de germinación de las semillas en los seis diferentes tratamientos en los cinco primeros días a partir de su siembra.	37
Gráfica 2. Seguimiento de la altura de <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	39
Gráfica 3. Seguimiento de los diámetros de <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	40
Gráfica 4. Seguimiento del número de hojas de <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	41
Gráfica 5. Coeficiente de biomasa por individuo de la cosecha de <i>Amaranthus hypochondriacus</i> en los diferentes tratamientos	42
Gráfica 6. Supervivencia de <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	43
Gráfica 7. Factor de traslocación (FT) y factor de bioacumulación (FB) de <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	44
Gráfica 8. Porcentaje final de germinación de semillas de <i>A. hypochondriacus</i>	50
Gráfica 9. Promedio final altura, diámetro, número de hojas y porcentaje de supervivencia de <i>Amaranthus hypochondriacus</i> .	51
Gráfica 10. Coeficiente de biomasa por individuo de la cosecha de <i>Amaranthus hypochondriacus</i> en los diferentes tratamientos.	54

Índice de cuadros

Cuadro 1. Valores del porcentaje final de germinación por tratamiento de sales disueltas de NaHCO_3	38
Cuadro 2. Valores de la altura de <i>Amaranthus hypochondriacus</i> en los tratamientos a través del seguimiento	39
Cuadro 3. Valores del diámetro del tallo de <i>Amaranthus hypochondriacus</i> en los tratamientos a través del seguimiento	40
Cuadro 4. Valores del número de hojas de <i>Amaranthus hypochondriacus</i> en los tratamientos a través del seguimiento	41
Cuadro 5. Valores del coeficiente de biomasa por individuo de <i>Amaranthus hypochondriacus</i> en los tratamientos a través del seguimiento	42
Cuadro 6. Valores del porcentaje de supervivencia de <i>Amaranthus hypochondriacus</i> en los tratamientos a través del seguimiento	43
Cuadro 7. Valores del factor de traslocación y bioacumulación de <i>Amaranthus hypochondriacus</i> en los tratamientos a través del seguimiento.	45
Cuadro 8. Análisis físicos y químicos del suelo	46
Cuadro 9. Análisis de la salinidad del extracto de saturación	48
Cuadro 10. Comparación de los tiempos del ciclo de vida y las fases fenológicas de <i>A. hypochondriacus</i> .	53
Cuadro 11. Valores y criterios de factor de traslocación y bioacumulación de <i>Amaranthus hypochondriacus</i>	56
Cuadro 12. Valores de C. E., pH y PSI para clasificar el tipo de suelo en base a las salinidad.	65

Dulce breviario para una dedicatoria.

*Dime si has escuchado hablar de la fragancia,
de la sustancia que con sutileza la alimenta,
que inunda tu mente y el sentido que intenta
vislumbrar lo que no tiene aparente presencia.*

*Si no has escuchado de ella, respira y date cuenta,
deja que te envuelva el dulce éter de la naturaleza,
el tibio y lucido rocío matinal que al día extasía,
el oculto sereno sombrío que a la noche alienta.*

*Ésta discreta envoltura que arrastra infinidad de aromas,
es incolora y en lo alto se torna densa y se aprecia;
no es la parda nata, velo de las citadinas formas,
que todo pudre, todo opaca y que el olfato desprecia.*

*Es la esencia misma que en cualquier lugar se encuentra,
que sustenta al vacío para que éste tenga coherencia
y no sea ocupado por los gases de la polución,
que con las artimañas de la producción, el humano inventa.*

Esaú García Romero.

Dedicatoria

Dedicado a todas las personas que con su labor y entendimiento
logran crear un cambio en favor de la naturaleza
ante los embates de la contaminación.

Agradecimientos

Agradezco esta tesis a la música, a las letras y a las artes por formar parte de mi vida y ser un gran apoyo emocional durante el tiempo en que escribía esta tesis.

A mis padres quienes me apoyaron todo el tiempo desde que yo era una semilla. Gracias por sus enseñanzas, por su sabiduría y por su amor.

A mi esposa Xanath quien me apoyó y alentó para continuar, cuando había turbiedad en mi mente. Gracias por acompañarme en la felicidad de ser Padre.

A mi pequeña hija Maya Nicté, que con su bella sonrisa y angelical mirada alimenta la naturaleza de mi humanidad. Gracias por haberme elegido como Padre.

A mis tres hermanos Misael, Mario y Josué Isaías por sus palabras de aliento y de sapiencia. Gracias por su grata compañía.

A mis profesores quienes nunca desistieron al enseñarme, aun sin importar quien fuera, a ellos que continuaron depositando su esperanza, labor y conocimiento en mí. Gracias por ser la fuerza que llena mi manantial de conocimientos.

A la directora de tesis, la Dra. Ester Matiana García Amador quien me dio grandes lecciones de practicidad y conocimiento.

A los sinodales quienes estudiaron mi tesis y la aprobaron.

Al financiamiento otorgado por PAPIME a través del proyecto PAPIME – PE201311

A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

Para todos ellos gracias por mi éxito.

Gracias

Resumen

Se evaluó la fitoextracción de *Amaranthus hypochondriacus* en un suelo en proceso de sodificación. *A. hypochondriacus* es una planta con metabolismo C4, en la que el sodio es un nutriente esencial, el cual se trasloca a las raíces, sube por el xilema y se aloja en las vacuolas de las células de las hojas. Esta cualidad le confiere la facultad de ser tolerante a la salinidad y a varios de los efectos provocados por el sodio intercambiable favorecido por los factores que intervienen en los procesos de sodificación. Por tal motivo se propone a esta planta como herramienta para la fitoextracción de sodio en suelos afectados por este catión. La fitoextracción, es un mecanismo de la fitorremediación enfocado a traslocar contaminantes a las raíces y/o acumularlos a los tallos y a las hojas con el fin de removerlos del suelo.

En este estudio se desarrollaron plantas de *A. hypochondriacus* en macetas con suelo comercial bajo condiciones de invernadero regado con NaHCO_3 como fuente de sodicidad a dos conductividades eléctricas, de 1 y 4 dS^{-1}m , para generar dos tratamientos salinos; así mismo se usó agua desionizada con conductividad eléctrica igual a 0 dS^{-1}m , para regar los testigos. Se regó a capacidad de campo cada tercer día, desde un mes antes de la germinación de la siembra directa hasta el fin del experimento, antes de que diera inicio la fase de floración o antesis. Los niveles de sodicidad de 1 y 4 dS^{-1}m de las dos condiciones de riego fueron aplicados en dos condiciones de siembra: directa (germinación de semilla) e indirecta (trasplantes de plántulas), generando así una siembra por bloques.

El objetivo general del presente trabajo fue evaluar la fitoextracción de sodio con *Amaranthus hypochondriacus*, desde su etapa germinativa hasta el inicio de la floración, en un suelo en proceso de sodificación; para ello se germinó, trasplantó y evaluó el desarrollo, tomando en cuenta la altura, el diámetro, el número de hojas, el coeficiente de biomasa y el porcentaje de germinación y de supervivencia. Para el factor de traslocación y bioacumulación se realizó un análisis de sodio en el suelo y en las estructuras de la planta: raíz, tallo y hoja por espectrofotometría de emisión atómica. El análisis de suelo y del extracto de saturación se realizó de acuerdo a las especificaciones de la NOM-021-RECNAT-2000 a excepción de la densidad real, densidad aparente y porcentaje de espacio poroso, que se realizó de acuerdo a Ríos, 1987. El análisis y tratamiento de los datos se realizó a través de un ANDEVA, utilizando el software estadístico "StataSE 11".

La sodicidad afecta la germinación, debido a que el porcentaje fue de 100 para los tratamientos con C.E. de 0 y de 1 dS^{-1m}, de 90 para tratamiento con C.E. de 1 dS^{-1m} y de 0 a conductividades más altas. La sodicidad afecta el desarrollo de la planta, debido a que el coeficiente de biomasa en los tratamientos con C.E. de 1 dS^{-1m} fue de 0.055 y en los tratamientos con C.E. de 4 dS^{-1m} de 0.40, además se observó que el valor del coeficiente es aún menor para las mismas conductividades (1 dS^{-1m} = 0.47 y para 4 dS^{-1m} = 0.027) en condiciones de siembra indirecta. Al igual que la biomasa el porcentaje de supervivencia se ve afectado, debido a que es del 100% en conductividades de 1 dS^{-1m} y condiciones de siembra directa, y disminuye hasta el 67% en conductividades de 4 dS^{-1m} y condiciones de siembra indirecta, donde el rendimiento de los cultivos muy sensibles puede ser restringido por estas conductividades. Los análisis de fertilidad indicaron que se ve afectada a medida que la sodicidad aumenta debido a que el ion en mayor proporción (del 50% a más), tanto en la caja de cambio como en la solución, es el sodio. Los análisis de salinidad indicaron que el suelo corresponde a uno sódico no salino, donde el PSI de la muestra inicial, equivalente al 68, disminuyó al final a un PSI de 50, indicando que el sodio usado en el agua de riego no se acumuló en el suelo y que fue removido por la planta. *A. hypochondriacus* es una planta acumuladora debido que reportó un factor de traslocación y bioacumulación cercano a 1. De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio, se establece que *A. hypochondriacus* puede ser utilizada como herramienta para la fitoextracción de sodio en suelos en proceso de sodificación.

Introducción

La salinidad está definida como la concentración de sales minerales disueltas presentes en el suelo y en el agua (Sonmez *et al.*, 2008). Las sales más frecuentes son los cloruros, sulfuros, boratos, carbonatos y bicarbonatos de metales del grupo IA y IIA de la tabla periódica (Layne *et al.*, 2007). Las sales son originadas a partir de los minerales que se encuentran formando las rocas que constituyen la corteza terrestre, estas se forman mediante procesos de intemperización de la roca, posteriormente se liberan los minerales constituyentes del suelo, que pueden mantenerse asociados o disociados en forma de compuestos binarios, ternarios y cuaternarios o de iones, respectivamente; la disposición de estos iones dentro del Medio Iónico Ambiental (MIA) puede ser en forma de iones solubles, hidratados e intercambiables, que se encuentran retenidos por carga eléctrica en los coloides (Porta *et al.*, 2009). Los cationes más abundantes son el Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} , encontrándose en menor cantidad el K^+ (Patel y Pandey, 2007). La acumulación de sales solubles influye en la formación de los suelos salinos (Sonmez *et al.*, 2008). Asimismo, la acumulación de sales solubles de bicarbonato de sodio origina sodio intercambiable, el cual influye en la formación de los suelos sódicos (Gasca *et al.*, 2011).

Hoy en día los problemas generados por la salinización de suelos son graves ya que afecta grandes áreas geográficas en todo el mundo. Los ciclos salinos naturales que intervienen en la formación de suelos salinos se han visto alterados de forma conspicua por la actividad humana, modificando la concentración y dinámica de las sales solubles contenidas dentro del sistema (Porta *et al.*, 2009). El movimiento, redistribución y acumulación de las sales en una cuenca permite explicar la formación de los suelos salinos (Hanor, 1994). Tanto en México como en partes específicas del mundo, existen zonas que presentan bajos niveles de precipitación sumado a altas tasas de evaporación, como es el caso de las zonas áridas y semiáridas, donde las sales solubles se encuentran en altas concentraciones. Este fenómeno se ve incrementado por la sequía, la cual disminuye los niveles de precipitación aumentando las concentraciones. La sequía no solo genera un impacto directo sobre el suelo, además genera un impacto sobre los cultivos de temporal, en donde la baja o nula precipitación tiene que ser sustituida por aguas residuales para uso agrícola (Qadir *et al.*, 2000).

El uso de aguas residuales con fin agrícola no solo es aplicado a zonas áridas y semiáridas (Miyamoto y Chacon, 2006). En México tiene su origen a partir de la construcción de una salida para las aguas residuales del valle de México. En 1980 se comenzó a aprovechar estas aguas

sin tratamiento en la agricultura en la región del Valle del Mezquital; Valsequillo, Puebla; Tulancingo, Hidalgo y Ciudad Juárez, Chihuahua. En el D.F. se reúsan casi 2.5 m^{3-1s} provenientes de dieciséis plantas de tratamiento. La planta de tratamiento del Cerro de la estrella, en Iztapalapa, inició su descarga de 75 L^{-1s}, sobre la zona canalera de Xochimilco con el fin de atender sus requerimientos hídricos (Cisneros, 2001). Dentro del riego con aguas residuales que contienen sales solubles, se diferencia el riego de sodicidad, que consiste en la irrigación de agua con alta concentración de sodio intercambiable. En las clases de agua de riego, los niveles de salinidad por sodio, están en función de la relación de absorción de sodio (RAS) y la conductividad eléctrica (CE), los cuales influyen en la respuesta en el desarrollo de los cultivos (USDA, 1954). En el presente trabajo se aborda en términos generales el concepto de salinidad, por ser el sodio una sal soluble; sin embargo, se hace énfasis en el concepto de sodicidad, debido a que son objeto de estudio las características específicas de este proceso, su dinámica y efectos sobre el suelo, así como la interacción sodio-suelo-planta.

Una vez presentes las sales de sodio en el suelo, sea por la introducción a través de procesos inducidos o naturales o por la atenuación de la concentración causado por factores ambientales, su disociación genera la presencia de sodio intercambiable (USDA, 1954). La presencia del ion Na⁺ en la MIA, pueden afectar la interacción suelo-planta debido a que genera una serie de efectos sobre el suelo, como la limitación por efecto del ión específico, problemas en la absorción de nutrientes, disponibilidad de agua (efecto osmótico), degradación de los canales de riego, degradación de la estructura superficial, dispersión coloidal, tendencia al sellado y encostramiento, disminución de la conductividad hidráulica, deficiente desarrollo radicular, toxicidad por sodio intercambiable, sodificación de las arcilla y translocación de las arcillas sódicas, colmatación de drenes enterrados, problema de arrastre de sedimentos y otros problemas erosivos. En las plantas influye directamente sobre su germinación y desarrollo, los efectos directos son: a) los cambios en la anatomía y morfología, y b) cambios en la fisiología y desarrollo; en este efecto están considerados tres modelos: modelo de la disponibilidad de agua o de la sequía fisiología, de la teoría del ajuste osmótico, y de la teoría de la toxicidad específica, la teoría de crecimiento y desarrollo celular, los cuales afectan con una intensidad que varía de unas plantas a otras, para un mismo valor de conductividad eléctrica (CE) o del porcentaje de sodio intercambiable (PSI), provocándoles diferentes niveles de estrés (Allison, 1977). El rol del ión sodio no es el mismo para todas las plantas, estudios recientes basados en la esencialidad de este, demostraron el rol que juega como elemento esencial en las plantas con vía metabólica C4 (Brownell y Crossland, 1972). Este trabajo está enfocado en la interacción

sodio-suelo-plantas, considerando al sodio como un elemento esencial en *Amaranthus hypochondriacus*, por ser una planta C₄, que trasloca y bioacumula este ion; con el fin de evaluar su desarrollo e índice de traslocación y bioacumulación de sodio en un suelo regado con NaHCO₃ como fuente de salinidad, para proponerla como herramienta para la fitoextracción y así determinar si es una planta apta para fitorremediar suelos en proceso de sodificación.

Marco Teórico

1. Generalidades sobre nutrición de las plantas.

La nutrición vegetal está fundamentada en un conjunto de procesos que permite incorporar elementos presentes en la solución del suelo para transformar en materia y energía. Los elementos presentes en la solución del suelo son tomados por las raíces jóvenes, a nivel de los pelos radiculares, para satisfacer sus requerimientos nutrimentales. Sin embargo, para su desarrollo normal se necesitan esencialmente solo unos pocos compuestos en la solución del suelo, en forma de sales minerales. Otros elementos llamados no esenciales, sesenta aproximadamente, también son absorbidos por las raíces en pequeñas cantidades, siempre que se encuentren en el medio nutritivo en forma de sal soluble (Sequi, 2004). La absorción de estos nutrientes pueden ser afectada por tres factores: los relacionados con el suelo, con la planta y con las condiciones climáticas. En las relacionadas con el suelo están la temperatura, porcentaje de oxígeno en el aire, pH, interacciones iónicas. En las relacionadas con la planta: naturaleza genética de la planta y estadio de la fase de desarrollo. Las relacionadas con las condiciones climáticas son la temperatura, humedad y luz (Navarro y Navarro, 2003).

Ha resultado difícil determinar cuáles son los elementos esenciales en las plantas; la mayoría de autores concuerdan, que absorben con preferencia los elementos ligeros como el carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y oxígeno (O) (Landis, *et al.*, 1989). Sin embargo no son los únicos, además, hay un pequeño porcentaje de otros elementos clasificados como macronutrientes y micronutrientes, dependiendo de la concentración relativamente grande o pequeña en que se encuentran en la planta. Los elementos esenciales para todas las plantas son trece: seis son considerados macronutrientes: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) y siete micronutrientes: hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), molibdeno (Mo), cobre (Cu), cinc (Zn) y cloro (Cl). Existen otros elementos esenciales solo para algunas plantas como son el sodio (Na), silicio (Si), cobalto (Co), vanadio (V) (Gutiérrez, 2002). El número de

estos elementos ha ido variando en el tiempo, pues el reconocimiento de la calidad de esencial ha sido paralelo con los avances en la química analítica donde se ha podido contar con técnicas que poseen límites de detección y cuantificación cada vez menores.

El desarrollo normal de las plantas puede verse altamente afectado cuando la concentración de los elementos esenciales o no esenciales en estado asimilable del suelo excede de un cierto nivel (curva de crecimiento), esta respuesta se caracteriza inicialmente por un aumento en el crecimiento a medida que aumenta la concentración (rango deficiente), hasta llegar a una óptima donde el crecimiento se mantiene estableciéndose una meseta (rango adecuado), pero luego concentraciones mayores provocan efectos negativos en la planta y el crecimiento disminuye (rango de toxicidad) (Garbisu y Alkorta, 1997). A través del análisis directo del suelo y de la planta es posible efectuar una evaluación del estado nutricional de las plantaciones (Díaz y Hunter, 1982).

Años anteriores a 1860, se consideraba al sodio como un simple estimulante o un parcial sustituto del potasio. A partir del año 1935, se trató de demostrar su esencialidad. En 1955, M.B. Allen y D.I. Arnon la establecen para el alga vercosa *Anabaena cylindrica*, y en 1957, P.F. Brownell y J.G. Wood para la *Atriplex vesicaria*. La mayoría de autores consideran que la esencialidad del sodio no puede generalizarse a todas las plantas, sino solo a la plantas C_4 (Navarro y Navarro, 2003).

2. Sodio

El sodio de la palabra latina *sodanum*, que significa remedio para el dolor de cabeza, tiene una masa de 22.99 g y una valencia de 1 (Na^+). Es el sexto elemento más abundante en la tierra, que comprende el 2.6 % de la corteza terrestre. Las sales de sodio se disuelven fácilmente en agua. Su radio iónico es de 0.097 nm, su radio hidratado es de 0.30 nm (Lauchli y Luttge, 2002).

El sodio en la naturaleza se encuentra como molécula sencilla debido a que puede existir de forma libre o asociado con átomos de su mismo tipo. Además se encuentra asociado a átomos de elementos diferentes, formando compuestos binarios, ternarios y cuaternarios como son el carbonato de sodio (Na_2CO_3), bicarbonato de sodio (Na_2HCO_3), cloruros de sodio ($NaCl$) y fosfato de litio, sodio y potasio ($KNaLiPO_4$). La naturaleza metal-alcalina del sodio le confiere una

baja electronegatividad y la pérdida de electrones origina su carga positiva, conociéndose este ion como catión sodio (Na^+). En el suelo el sodio puede estar disponible en forma soluble, hidratada e intercambiable. De acuerdo a sus propiedades químicas este catión puede formar parte de óxidos, estos óxidos metálicos producen bases y de su neutralización con ácidos se forman sales. En compuestos con cationes multivalentes es posible que se den neutralizaciones parciales y resulten sales ácidas o básicas, como el bicarbonato de sodio (Na_2HCO_3) y el cloruro básico de magnesio (MgOHCl), respectivamente; este tipo de sales pueden ser neutralizadas con un ion diferente, originando sales mixtas como el carbonato de sodio potásico (KNaCO_3) (Rueda, 2009).

3. Acumulación de sodio en los suelos.

La acumulación de sales solubles de bicarbonato de sodio influida por procesos naturales o inducidos origina la formación de los suelos sódicos. De forma natural todos los suelos contienen sales solubles, condición que guardan también las aguas. Las sales más frecuentes son los cloruros, sulfuros, carbonatos y bicarbonatos de metales del grupo IA y IIA de la tabla periódica. La fuente original de donde provienen las sales del suelo y del agua, son los minerales que se encuentran formando las rocas que constituyen la corteza terrestre. Su formación se realiza mediante el proceso de intemperización (hidrólisis, solución, oxidación y carbonatación, a veces precipitación) de las rocas, donde se liberan los minerales que a la postre constituyen los suelos. El movimiento, redistribución y acumulación de tales componentes minerales en una cuenca de drenaje permiten explicar la formación de los suelos salinos (Jaramillo, 2002). Las sales en el suelo se encuentran asociadas (formando compuestos) o disociadas (como cationes o aniones). En caso de estar presentes como iones, se pueden encontrar en tres diferentes disposiciones, formando el medio iónico ambiental (MIA). Estar en forma de iones solubles, existentes en la solución del suelo; iones hidratados, a presión en las arcillas o material orgánico muy fino; y por último, en forma de iones intercambiables, retenidos por carga eléctrica en los coloides: las arcillas o material orgánico fino. Los cationes más abundantes son el Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} , encontrándose en menor cantidad el K^+ (Thompson y Troeh, 1988).

El sodio se asocia a carbonatos, bicarbonatos, cloratos y sulfatos; los carbonatos y bicarbonatos asociados al sodio, están, en función del pH del suelo, encontrándose en cantidades considerables a pH 8.5 o más (Rueda, 2009). La presencia de carbonatos y bicarbonatos indica unas condiciones físicas y químicas espécies, ligadas a procesos de

alcalinización del suelo (Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)>15%), tienen pH superiores a 9, pudiendo llegar a 12. La hidrólisis del carbonato de sodio es el origen de valores de pH tan elevados: $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{Na}^+ + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$. Los efectos desfavorables del Na_2CO_3 desaparecen cuando las concentraciones de esta sal son del orden de 0,05 a 0,1 %. El bicarbonato de sodio da lugar a condiciones menos alcalinas y por lo tanto menos tóxicas: $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{NaHCO}_3$ (Porta *et al.*, 2009).

3.1 Procesos de formación de suelos con altos contenidos de sales.

Los procesos por los cuales se forman estos suelos, tienen dos orígenes fundamentales: naturales e inducidos. En los procesos formativos naturales se divide en tres: *in-situ*, aquellos que se forman por descomposición de la roca en el mismo lugar donde yacen; *en cuencas cerradas*, donde las corrientes acarrear las sales solubles a estanques, que al evaporarse, aumentan las concentraciones de las sales; y *marino*, del cual existen cuatro variantes: geológicos, costeros, meteorológicos y por intrusión. En los procesos formativos inducidos, el origen de las sales obedece al inadecuado manejo que el hombre hace del suelo y del agua en los suelos agrícolas bajo riego (Navarro y Navarro, 2003).

3.1.1 Los procesos naturales de formación de suelos con altos contenidos de sales

Los procesos naturales de formación de suelos con alto contenido de sales están influidos directamente por los ciclos de salinización y depende principalmente de factores litológicos, geomorfológicos, climatológicos, hidrológicos. Los ciclos de salinización se dividen en: Ciclos continentales de acumulación primaria y de acumulación secundaria de sales, ciclos marinos de acumulación de sales, ciclos deltaicos de acumulación de sales, ciclos artesianos.

En los ciclos continentales la formación de los suelos salinos en las tierras del interior de los continentes se debe a ciclos de movilización, redistribución y acumulación de cloruros, sulfatos, bicarbonatos y carbonatos sódicos que están condicionados por el clima (aridez o semiaridez), régimen de humedad del suelo (no percolante, árido, xérico, o ústico), posición geomorfológica (fondo o parte basal de laderas), clase de drenajes (deficiente). En los ciclos de acumulación primaria los elementos son liberados <<in situ>> sin mediar el transporte. En los ciclos de acumulación secundaria los elementos son movilizados, redistribuidos y acumulados a ciertas distancias de su lugar de origen.

En los ciclos marinos los suelos de las llanuras a lo largo de las costas, bahías, y marismas pueden presentar cloruro de sodio, procedente de capas freáticas salinas poco profundas, del agua de inundación por efecto de las mareas o por los aportes de sales transportados por el viento.

En los ciclos deltaicos el aporte de las sales se debe a la interacción entre el agua de mar, el agua aportada por el río cuyo contenido salino es bajo y por el manto freático salino.

En los ciclos artesianos el aporte salino se debe a la surgencia de aguas freáticas profundas, que ascienden a través de microfallas y fracturas. En su movimiento ascendente pueden atravesar materiales que de origen a su salinización (Porta *et al.*, 2009).

3.1.2 Los procesos inducidos de formación de suelos con altos contenidos de sales

Los procesos inducidos de formación de suelos con altos contenidos de sales están influidos directamente por los ciclos de salinización antrópicos, que modifican los ciclos naturales de salinización, debido a las actividades industriales y mineras mal realizadas, que pueden dejar en la superficie materiales salinos, sódicos; así mis molas actividades agrícolas tienen que ver con el uso de fertilizantes inadecuados, riego con aguas residuales depuradas por polielectrólitos y por desconocimiento de los procesos de salinización y los factores que la controlan (Porta *et al.*, 2009).

3.1.2.1 Proceso inducido por las aguas con altas concentración de sodio.

Naturalmente, los componentes químicos del agua son electrolitos representados por aniones (bicarbonatos, sulfatos, fosfatos, silicatos y cloruros) y cationes (alcalinotérreos: calcio y magnesio; alcalinos: sodio y potasio; y oligoelementos metálicos: sobre todo hierro y manganeso), algunos de ellos procedentes de la roca madre, otros de la oxidación de los compuestos orgánicos de la cuenca, de la síntesis de compuestos en la atmósfera. En los sistemas lenticos el poder tampón del agua mantiene un determinado número de reacciones de equilibrio entre CO_2 , H_2CO_3 , H^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Ca^{++} y Mg^{++} . Esto genera una disponibilidad de

sales solubles e insolubles. Los electrolitos disueltos en los sistemas lóxicos están negativamente correlacionados con el caudal. Debido a que la disolución está en función de la superficie de contacto sustrato-agua y del tiempo de tránsito. El caudal aumenta proporcionalmente a la velocidad de la corriente y el tiempo de tránsito disminuye, diluyendo los electrolitos en un volumen mayor de agua (Eugene, 2002).

Estas sales, también llamadas impurezas, no están incluidas dentro del concepto de contaminación, ya que al atravesar como precipitación las nubes y la atmósfera, y al discurrir por el suelo o a través de él, han incorporado elementos o partículas, que dan origen a lo que se entiende como impureza del agua; entre estas encontramos iones, moléculas, compuestos, polvos, partículas minerales, organismos y virus de forma suspendida, coloidal o disuelta (Hernández, 1992).

El riego con aguas cargadas de sales solubles, causan dos problemas en el suelo: el primero es el incremento del potencial osmótico del suelo, causando a la planta un trabajo más duro a la hora de absorber agua y dispersión coloidal creada por el sodio. Como resultado la superficie del suelo se sella y se forman costras. Otro problema se asocia con la calidad química del agua para riego, es el generado por las aguas procedentes de la explotación de pozos profundos, que ha tenido efectos negativos en varios ámbitos. Los compuestos en las aguas freáticas profundas corresponden al 79% de bicarbonato sódico, 20% a bicarbonato cálcico y el restante 1% a cloruro sódico (García *et al.*, 2006).

La agricultura, en cuanto mayor usuario del agua dulce a escala mundial y principal factor de degradación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos como consecuencia de la erosión y de la escorrentía química, justifica la preocupación existente por sus repercusiones mundiales en la calidad del agua a escala mundial (Ongley, 1997).

3.1.2.1.1 Manejo de riego con aguas residuales.

Comúnmente, el agua residual doméstica con o sin tratamiento se emplea en el riego agrícola. En regiones áridas y semiáridas, el riego con aguas negras es una costumbre antigua, esto con el fin de reaprovechar sus nutrientes en los cultivos. La limitación principal consiste en evitar el contacto directo del agua residual con cosechas de consumo directo (Cisneros, 2001). La aridez climática y la baja capacidad de infiltración de los suelos no hacen sino acelerar los procesos

que en los últimos tiempos se han visto agravados por la introducción de riegos localizados de alta frecuencia, que mantienen la solución edáfica diluida, permitiendo así obtener notables producciones, pero sin eliminar las sales o el sodio del suelo y llevando así a una salinización oculta a medio-largo plazo de los suelos cultivados (Vargas y Rodríguez, 2000), sin embargo los problemas salinos no se limitan a estas áreas, pueden presentarse aún en regiones subhúmedas en condiciones propicias (Gasca *et al.*, 2011).

A nivel mundial se considera que existen más de 890 millones de hectáreas afectadas por salinidad en diferentes grados, lo que representa aproximadamente 6% de la superficie total mundial. En México, 10% de la superficie irrigada está afectada por sales (Trejo *et al.*, 2013). El uso de agua residual para riego agrícola en México tiene su origen a partir de la construcción de una salida para las aguas residuales del valle de México. En 1980 se comenzó a aprovechar estas aguas sin tratamiento en la agricultura en la región del Valle del Mezquital; Valsequillo, Puebla; Tulancingo, Hidalgo y Ciudad Juárez, Chihuahua. En el D.F. se reúsan casi 2.5 m³/s provenientes de dieciséis plantas de tratamiento. La planta de tratamiento del Cerro de la estrella, en Iztapalapa, inicio su descarga de 75 L/s, sobre la zona canalera de Xochimilco con el fin de atender sus requerimientos hídricos (Cisneros, 2001), aun después del tratamiento secundario en la planta el agua contiene en promedio 75.72 mg L⁻¹ de sodio en 149.8 m³ de agua al día (Ramos, *et al.*, 2001). El volumen aproximado de estas aguas residuales del valle de México que se vierten en el valle del Mezquital y que escurren hacia la cuenca del río Pánuco para desembocar en el Golfo de México, es de aproximadamente 2553.8 mm³ anuales (Velázquez *et al.*, 2002)

3.1.2.1.2 Riego de Sodicidad.

Dentro del riego con aguas residuales que contienen sales solubles, se diferencia el riego de sodicidad, que consiste en la irrigación de agua con alta concentración de sodio intercambiable. En las clases de agua de riego, según el riesgo de sodio, los niveles de salinidad por sodio, están en función de la relación de absorción de sodio (RAS) y la conductividad eléctrica (CE), los cuales influyen en la respuesta en el desarrollo de los cultivos (USDA, 1954). En la figura 1 del anexo, se muestra las clases de agua de riego, según el riesgo de salinidad. La salinización y sodificación de los suelos de regadío constituyen unos de los procesos de degradación química del suelo que en mayor medida han contribuido y contribuyen a la desertificación de amplias zonas del territorio (Vargas y Rodríguez, 2000). Se estima que por arriba de 800 millones de

hectáreas en el planeta están afectadas por sales, de estas 397 millones lo son por problemas de salinidad y 434 millones por condiciones asociadas a sodicidad (Palomo *et al.*, 2013).

3.1.2.1.3 Índice RAS (Relación de absorción de Sodio)

Este índice que sirve como referencia para medir los niveles de salinidad, se define como el cociente de la concentración de sodio sobre la suma de las concentración de calcio y magnesio a la un medio. La alta mineralización del agua combinada con una Relación de Absorción de Sodio (RAS) elevada puede tener efectos adversos en el suelo, como la alteración de su estructura y la modificación de la permeabilidad. Los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} , en las proporciones habituales encontradas en el suelo, mantienen la estructura de estos. Cuando son regados con aguas con alto contenido de Na intercambiable, este sustituye a los aniones alcalinotérreos de las arcillas, desfloculándolas y provocando la impermeabilización del suelo. Este riesgo se mide por medio del RAS y de la salinidad del agua (Gasca, 2011). El agua cuyo contenido de sales disueltas sea superior de $2,000 \text{ mg L}^{-1}$ es aceptable para la mayor parte de los cultivos, excepto de los muy sensibles (Cisneros, 2001).

3.1.2.1.4 Normatividad de las aguas residuales para uso agrícola.

En México, las aguas residuales de muchas ciudades fueron concesionadas a los agricultores antes de que la Ley Federal de Desechos de Agua las especificara y regulara como tales. La preferencia de las aguas residuales sobre las claras por su cualidad fertilizante, influyó en la utilización de estas por la actividad agrícola sin que existiera ningún control de tipo sanitario. Las primeras normas en este sentido fueron las **NTE-CCA-032-ECOL/1993** y la **NTE-CCA-033-ECOL/1993**, que establecían el uso de aguas residuales en riego agrícola. Actualmente, la **NOM-01-ECOL/1997** regula esta práctica (Cisneros, 2001).

Una vez incorporadas las sales solubles, ya sea de forma natural o inducida, ocurren los procesos por los cuales los suelos se salinizan o se sodifican, estos dependen del tipo de sal presente y la concentración suministrada (Palomo *et al.*, 2013)

3.2. Proceso de salinización y sodificación.

Los procesos de salinización y sodificación que normalmente ocurren en los suelos cultivados resultan del desbalance entre las entradas y salidas de sales en el mismo. Tales procesos están determinados por la concentración y composición iónica del agua de riego, las condiciones de drenaje interno del suelo, la magnitud de la lluvia de la localidad y el manejo del riego (Villafañe *et al.*, 2004.)

La acumulación de sales en la zona radicular puede ser aportada por las aguas de riego o provenir de las aguas freáticas, de forma continua y constante, y/o que se sobrepase la capacidad natural del drenaje de los suelos, favoreciendo un desplazamiento de las masas salinas en condiciones naturales o propiciadas por el hombre (Rueda, 2009).

En el presente trabajo se utilizara el concepto de salinización como un proceso, natural o antrópico, por el cual las sales más solubles que el yeso se acumula en el suelo y el de sodificación, como un proceso natural o antrópico, por el cual aumenta el sodio intercambiable, sin producir necesariamente un cambio en el pH (Vargas *et al.*, 2000).

3.2.1 Factores que favorecen el proceso de salinización y sodificación.

Los procesos de salinización de un suelo está condicionado por las aguas de mala calidad, con concentraciones altas de sales solubles; mal drenaje, por presencia de arcillas finas o capas cementadas con carbonato de calcio (CO_4Ca) y carbonato de sílice (CO_4Si), que beneficia la formación de mantos freáticos elevados; las aguas freáticas superficiales, que benefician el ascenso capilar de las sales; el clima, relacionado a las altas tasas de evaporación y baja precipitación, que evitan el lavado natural de las sales; y por último, la topografía accidentada y la evaporación geológica y edafológica, que facilitan la formación de acuíferos y represamiento superficiales (Navarro y Navarro, 2003).

4. Sodio en el suelo

Los procesos de salinización y sodificación influyen en grandes extensiones terrestres, por lo cual es necesario tener una clasificación de los suelos en función de estos procesos. De acuerdo

al tipo de sales solubles y sus concentraciones presentes, resultará una dinámica y un efecto específico sobre el suelo (Zinck, 2005).

4.1 Clasificación de los suelos con base a la salinidad y sodicidad.

Todos los suelos contienen sales de varios tipos y en diferentes cantidades. Estos son típicos de las regiones áridas y semiáridas, donde las sales solubles se acumulan en el horizonte donde lo hace también la materia orgánica. Estas sales están constituidas por sodio, cloro, magnesio, calcio y sulfatos. La terminología concerniente a suelos afectados por sales varía de autor a autor y está en función de la presencia o ausencia de ciertas sales, cantidad de sales y nivel crítico de salinidad para las plantas (Rueda, 2009).

Desde un punto de vista de la pedología se han distinguido tres tipos de suelos salinos: Solonchack primario, secundario y oculto. El solonchack primario corresponde a suelos de regiones áridas, con desarrollo de perfil pobre y deficientes en materia orgánica. El solonchack secundario, que corresponde a suelos con un perfil desarrollado, que son afectados por la salinidad únicamente en una etapa tardía de su formación. El solonchack oculto corresponde a aquellos suelos de las regiones áridas y semiáridas en los que las sales se han acumulado en el subsuelo (Rueda, 2009).

La clasificación más usual y empleada en este trabajo está basada en dos propiedades químicas: la conductividad eléctrica (CE) y el porcentaje de Na intercambiable (PSI), generando tres tipos de suelos: los suelos salinos no sódicos, suelos sódicos no salinos y suelos salinos sódicos. Los suelos salinos no sódicos corresponden a aquellos cuya CE del extracto de saturación es mayor a 4 mmohs/cm a 25°C, un PSI menor de 15 % y un pH menor a 8.5. Los suelos sódicos no salinos, corresponden a una CE menor a 4 mmohs/cm a 25° C, un PSI mayor al 15% y el pH varía entre 8.5 y 10.00. Los suelos salinos-sódicos, corresponden aquellos cuya CE es mayor a 4 mmohs/cm a 25° C, el PSI es mayor a 15% (Palomo *et al.*, 2013).

4.2 Contenido y dinámica del sodio en el suelo

En el suelo, el sodio procede de los minerales silicatados, como la horblenda y moscovita. Los suelos más ricos son los que por mucho tiempo se han encontrado inundados por el agua de mar, los abonados con fertilizantes sódicos, aquellos originados bajo climas áridos (Navarro y Navarro, 2003), suelos agrícolas regados con aguas residuales o con alta relación de absorción de sodio (Cisneros, 2001).

La capacidad de los suelos de adsorber los cationes potasio, sodio, calcio y magnesio, está relacionada con el intercambio catiónico y el porcentaje de saturación de bases. Dentro del suelo, los factores que influyen notablemente en la dinámica de cambio de bases del suelo son el poder de fijación de los cationes de cambio, capacidad de saturación del suelo y naturaleza de los cationes, temperatura y constituyentes coloidales del suelo.

Dentro de la serie de cationes absorbidos por el coloide, el sodio guarda el último lugar en el siguiente orden decreciente: $H^+ > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^+ > NH_4^+ > Na^+$. Esta ordenación está establecida teniendo en cuenta la relación directa entre la valencia y el poder de fijación del catión, y su estado hidratado. Las concentraciones en las disoluciones interna y externa, son diferentes pero guardan un equilibrio entre ellas. Esto se debe al cambio de pH por el aporte de H^+ de la lluvia o riegos, la respiración de las raíces del vegetal y los microorganismos, descomposición de la materia orgánica; por la absorción de cationes por el sistema radicular de la planta, por la transformación bioquímica de los compuestos amónicos en nitritos y nitratos, y aportación de fertilizantes solubles. La concentración de cationes en la disolución externa está en menor proporción que la de los cationes fijados al coloide. Con respecto a la capacidad de saturación y naturaleza de los cationes fijados, cuando el complejo coloidal está altamente saturado por determinado catión y muy poco por otros cationes, estos son más difícilmente intercambiables. El sodio se fija con dificultad aunque no se encuentre absorbido. Al estar fijado el sodio, es más difícilmente intercambiarlo cuando se encuentra en gran proporción (Navarro y Navarro, 2003). A un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) entre el 15 y 20% el calcio de las superficies externas es sustituido por el sodio generando un fenómeno de dispersión, mientras que con un PSI del 50% el sodio se sustituirá en el interior del tactoide generando un colapso del coloide (Porta *et al*; 2009).

El poder absorbente del suelo disminuye de intensidad al aumentar la temperatura. Esto pasa cuando se trata al suelo con una disolución y se deja hasta que se alcance el equilibrio: complejo-disolución, al aumentar la temperatura el equilibrio se desplaza y el complejo cede cationes a la disolución. La absorción de cationes con respecto a los componentes coloidales está altamente relacionada con las proporciones de las arcillas silíceas, del humus y de los óxidos de Fe, Mn y Al encontrados en el suelo (Navarro y Navarro, 2003).

El sodio es el catión más activo en lo que se refiere a la alcalinidad. La serie de actividad alcalina se ordena de $\text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+} < \text{K}^+$. Lo que produce mayor disponibilidad del calcio, magnesio y boro. Las propiedades físicas de los suelos dependen de la composición de los cationes intercambiables, de la concentración electrolítica y del tipo de sales presentes, lo cual afecta la distribución de iones próximos a la superficie y, por ende, el acomodamiento de las partículas (Martínez *et al.*, 2001).

4.3 Efectos del sodio en el suelo.

Son varios los impactos relacionados por el incremento de sodio dentro del suelo. Los impactos que podemos encontrar son la disminución de la germinación de la semilla limitación por efecto de ión específico, problemas en la absorción de nutrientes, disponibilidad de agua (efecto osmótico), degradación de los canales de riego, degradación de la estructura superficial, dispersión coloidal, tendencia al sellado y encostramiento, disminución de la conductividad hidráulica, deficiente desarrollo radicular, toxicidad por sodio intercambiable, sodificación de las arcilla, translocación de las arcillas sódicas, colmatación de drenes enterrados, problema de arrastre de sedimentos y otros problemas erosivos (Porta *et al.*, 2009).

De acuerdo a la serie liotrópica, que es la ordenación de los cationes de mayor a menor de acuerdo a la energía con que son retenidos, el sodio es muy lixiviable debido a la baja capacidad de retención por los coloides del suelo (Rueda, 2009). Este catión es llevado al mar por el agua de los ríos, por acción del viento retornar al suelo de las zonas costeras. Se lava fácilmente bajo condiciones de lluvia abundante o riego constante en suelos con un nivel freático bajo; otra parte es adsorbido por el suelo con un poder de retención bajo (Navarro y Navarro, 2003).

En regiones áridas (zonas con lluvias menores a 500 mm/año), algunos suelos se desarrollan bajo condiciones de drenaje pobre, y se evapora más agua que la captada por lluvias. En estas

condiciones las sales solubles y el sodio adsorbido pueden acumularse en cantidades elevadas en el horizonte superficial, e impedir el crecimiento de las plantas. El efecto causado sobre el metabolismo vegetal por la alta alcalinidad, es originado por la toxicidad del anión bicarbonato y carbonato, y el exceso de sodio activo (Na^+). Si las sales solubles se lavan, se incrementa el pH al hidrolizarse el complejo sódico y aumentar la concentración de OH^- . El efecto dispersante en el suelo producido por la alta concentración de sodio activo, separa los coloides que conforman la estructura cerrada en el suelo. Si la dispersión se produce en la superficie del suelo se reduce la infiltración y si se produce en la profundidad se afecta el drenaje interno (Villafañe *et al.*, 2004). Como resultado del aumento de pH y de la dispersión, los poros del suelo se reducen y aumenta la impermeabilidad (Navarro y Navarro, 2003).

5. Sodio en las plantas.

El rol del ion sodio no es el mismo para todas las plantas. Estudios recientes basados en la esencialidad de este, demostraron el rol que juega como elemento esencial en las plantas con vía metabólica C_4 . Una vez presente el sodio en el medio iónico ambiental (MIA) se hace disponible para la planta, junto con otros nutrimentos esenciales y no esenciales, estos son absorbidos mediante un mecanismo de ingreso y llevados de la raíz a las estructuras aéreas, generando concentraciones específicas en los tejidos vegetales y efectos sobre la germinación y el desarrollo de las plantas. Sin embargo, ha habido naturalmente adaptaciones de las plantas a medios salinos, las cuales las vuelven más resistentes y tolerantes a estas condiciones (Brownell y Crossland, 1972).

5.1 Esencialidad del sodio en las plantas.

Arnol y Stout (1939), establecieron tres criterios de esencialidad de nutrimentos para las plantas y luego fueron modificados por Epstein en 1965. Los criterios son: 1) La omisión del elemento en cuestión debe resultar en un desarrollo anormal, fracaso para completar su ciclo de vida o muerte prematura de la planta. 2) El elemento de ser específico e irremplazable. 3) El elemento debe ejercer su efecto directamente sobre su desarrollo o metabolismo u otra estructura química de la planta (Navarro y Navarro, 2003).

En las últimas cuatro décadas se han desarrollado numerosos trabajos para estudiar el rol del sodio en las plantas C_4 . Brownell, 1965; Brownell, 1967; Brownell y Crossland, 1972; Brownell *et*

al., 1991; Brownell y Bielig, 1996; Grofetal., 1986a; Grofet *al.*, 1986b; Johnston *et al.*, 1984; Johnston *et al.*, 1988, han entregado valiosa información al respecto a el sodio como un elemento esencial para las plantas C4 como micronutriente. Sin embargo, otros investigadores, sostienen que si bien el sodio cumple una función especializada en algunas especies C4, consideran que dicha función es aún insuficiente para incluirlo dentro de los nutrientes esenciales de plantas superiores y recomiendan una revisión del criterio de esencialidad puesto que además deberían incluir dentro de esta categoría aquellos elementos que promueven un máximo producto o biomasa y/o aquellos que reducen el requerimiento (nivel crítico) de un elemento esencial; como alternativa a éstos últimos sugieren también llamarles «nutrientes funcionales» y entre éstos sitúan al sodio y probablemente también al silicio y selenio. Actualmente, se acepta que el sodio es un nutriente esencial para la mayoría de las plantas C4 y así lo demuestran los ensayos efectuados por Brownell (1965), Brownell(1967), Brownell y Crossland (1972) en plantas C4 y C3 cultivadas en soluciones nutritivas con concentraciones de sodio 0,08 μm y 0,1 μm .

5.2 Sodio en el metabolismo de las plantas C4.

En las plantas con metabolismo C4, también llamada del ácido dicarboxilico, el aceptor inicial del CO₂ es el fosfoenolpiruvato (PEP) y en lugar de formar una molécula de seis carbonos forman primero uno de cuatro, el ácido oxaloacético, luego ácido málico, y se libera después un carbono que sigue el ciclo normal de Calvin, mientras, también con intervención del ATP, se regenera fosfoenolpiruvato (Salisbury y Clean, 2000). Previamente se debe destacar que en plantas C4, se pueden distinguir tres tipos diferentes de fotosíntesis y éstas se relacionan con los compuestos C4 formados (malato o aspartato) y las enzimas descarboxilantes en las células de la vaina vascular. Así, se han reconocido los tipos donde participa la enzima málica dependiente del NADP (NADP-ME), la enzima málica dependiente del NAD (NAD-ME) y la fosfoenolpiruvato carboxiquinasa (PEP-CK) (Ghannoum, 2008). Estas diferencias son las que no permiten hacer generalizaciones respecto a plantas C₄. La función específica del sodio en las plantas se desconoce. Algunos investigadores han señalado su posible acción como activador de la enzima carboxilasafosfoenolpirúvica, primer enzima de carboxilación en la fotosíntesis de plantas C₄, como se muestra en la secuencia de reacciones en la fotosíntesis de la figura 1. En las plantas donde se considera esencial, se acepta que regula ciertos procesos respiratorios y glucolíticos (Navarro y Navarro, 2003).

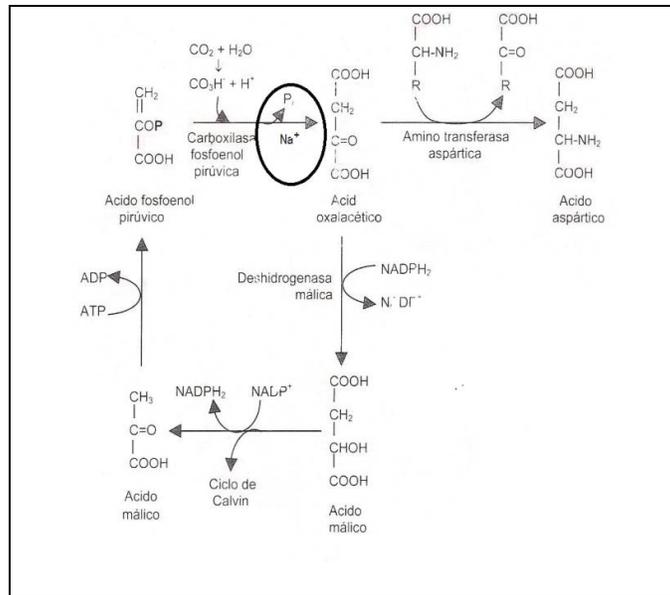


Fig. 1 Secuencia de reacciones en la fotosíntesis de las plantas C4 y participación del sodio. Fuente: Navarro y Navarro, 2003.

5.3 Mecanismo de ingreso de sodio a la planta.

La absorción de los alimentos minerales es tan importante para un buen crecimiento de las plantas como la absorción de agua. La absorción de sal y su transporte a los vástagos de las plantas enteras, implica la acumulación de iones en las vacuolas de las células radicales debido al metabolismo celular, independiente del movimiento hacia dentro del xilema. La acumulación de iones por células individuales es un proceso altamente selectivo, pues iones como los de sodio suelen ser excluidos e inclusive retirados por medio de alguna clase de proceso secretorio en algunas plantas.

Los mecanismos para el ingreso de sodio a la planta están divididos en cuatro etapas: 1) el movimiento desde los iones del suelo hasta la superficie de la raíz; 2) la acumulación de iones en células de la raíz; 3) el movimiento radial de los iones desde la superficie de la raíz hacia dentro del xilema; y 4) el traslado de los iones desde las raíces hasta los vástagos.

La absorción de los minerales implica a la entrada de sustancias en las células o tejidos, por cualquier mecanismo. La acumulación se refiere a la deposición de esas sustancias en particular dentro de una célula o tejido, según un gradiente de concentración o potencial electroquímico por gasto de energía metabólica. El movimiento de materiales de acuerdo al gradiente de concentración, que exige un gasto de energía metabólica, se llama transporte

activo. En contraste el movimiento pasivo indica movimiento por difusión según gradientes de concentración decreciente o potencial electroquímico, o por flujo masivo causado por gradientes de presión tales como los que se producen por transpiración a través de las raíces y dentro del xilema.

La acumulación de iones sólo puede percibirse tras membranas permeables o semipermeables, porque las sustancias se escurren por difusión a través de esta. Estas membranas vegetales son de estructuras muy diversas, desde las capas monomoleculares en las interfaces hasta las membranas de orgánulos y células individuales y membranas multicelulares como la epidermis y la endodermis, y las muchas capas de células suberificadas que constituyen la superficie de los tallos y raíces leñosas.

Dentro de las células existe un espacio libre aparente, que es la parte de una célula o tejido adentro y afuera del cual pueden moverse libremente los iones por difusión, en contraste que en el espacio exterior, no libre u osmótico que es inasequible a los iones por difusión pero en el cual se encuentran acumulados de un modo más o menos irreversible por transporte activo.

5.4 Concentraciones en los tejidos vegetales

El sodio es absorbido en forma de ion (Na^+). El contenido de este puede variar en la planta en función del existente en el suelo, de la especie que se considere y del órgano que se analice. Como valor medio se aceptan 1200 ppm en peso seco (Navarro y Navarro, 2003).

5.5 Efectos del sodio en el desarrollo de las plantas.

El crecimiento en medios salinos se ve afectado desfavorablemente, con una intensidad que varía de unas plantas a otras, para un mismo valor de conductividad eléctrica (C.E.) o de la porcentaje de sodio intercambiable (P.S.I.), provocando diferentes niveles de estrés en las plantas. En el caso de plantas no halófitas la presencia de sales en el suelo provoca una sintomatología con una inhibición irreversible del crecimiento, en los siguientes casos: Retardo en la nacencia, menor área foliar y talla de la planta, menor producción de materia seca, quemaduras en los bordes de la hojas o necrosis, hojas con color verde oscuro, disminución del rendimiento de los cultivos y muerte de la planta por condiciones extremas (Trejo *et al.*, 2013).

Los efectos sinérgicos de la salinidad (efectos osmóticos y/o de ion-específico) y de la sodicidad (efecto de sodio intercambiable) sobre el suelo sirven de base para explicar la sintomatología de la planta frente a tales efectos. Los principales efectos directos que provoca la salinidad en la planta son: a) los cambios en la anatomía y morfología, y b) cambios en la fisiología y desarrollo; en este efecto están considerados tres modelos: modelo de la disponibilidad de agua o de la sequía fisiología, de la teoría del ajuste osmótico, y de la teoría de la toxicidad específica, la teoría de crecimiento y desarrollo celular (Rueda, 2009).

La teoría de la disponibilidad de agua o de la sequía fisiología postula que en condiciones de salinidad, a pesar de que el suelo contenga agua, la planta no es capaz de absorberla, y por consiguiente, el protoplasma de sus células tienen una baja hidratación: la planta sufre estrés hídrico, se seca y se marchita (Porta *et al.*, 2009).

La teoría del ajuste osmótico, supone que las plantas, al aumentar la presión osmótica del agua del suelo, se ven obligadas a realizar una adaptación osmótica en sus células para poder absorber el agua. Este ajuste requiere un consumo de energía, que se hace a costa de menor crecimiento. A pesar del ajuste la planta no consigue recuperar su crecimiento normal (Porta *et al.*, 2009).

El efecto ión-específico da lugar a la teoría de la toxicidad específica, con alteración de la actividad metabólica de la planta (Porta *et al.*, 2009).

La teoría de la división y el crecimiento celular, atribuye la inhibición del crecimiento a que las sales afectan la división celular y producen un engrosamiento prematuro de las paredes celulares, lo que impide su crecimiento de forma irreversible, a pesar del ajuste osmótico o que el medio deje de ser salino (Porta *et al.*, 2009).

5.5.1 Salinidad y germinación

La tolerancia a la salinidad varía a lo largo de las distintas fases de desarrollo de una planta. En suelos con problemas de sales es frecuente que haya una mala nacencia, que dependerán de la genética de la planta y del nivel y tipo de salinidad (Porta *et al.*; 2009). La respuesta de las semillas al estrés osmótico provocado por las sales está relacionada con la capacidad de

absorción de agua por el embrión, que presenta un requerimiento mínimo necesario para el inicio de la división y crecimiento celular y la emergencia de la radícula (Hegarty, 1987).

La germinación consiste en la reanudación de la actividad metabólica y el crecimiento activo de los tejidos del embrión, lo que resulta en la ruptura de la cubierta de la semilla y la emergencia de la plántula. En orden secuencial, la utilización de las reservas y la formación de las estructuras de síntesis que permitirán a la plántula asumir un modo autótrofo de existencia (Legaria *et al.*, 2000).

Posteriormente a la germinación de la semilla, se presentan tres etapas en ella: La etapa heterotrófica, que es dependiente de las reservas del endospermo; la etapa de transición, que ocurre cuando se acaban de consumir las reservas se inicia la fotosíntesis; y la etapa autotrófica, que ocurre cuando se alcanza la plena nutrición a partir de la fotosíntesis. La etapa heterotrófica no tendrá lugar si un exceso de sales impide que las semillas se humecten, debido a que no dispone de agua por la elevada presión osmótica del medio bien puede morir por el efecto tóxico de ciertos iones. Al iniciarse la fase autotrófica la presencia de sales controlará el crecimiento de la joven plántula. En estadios posteriores al desarrollo algunas plantas presentan una mayor tolerancia a la salinidad. Sí la salinidad es moderada tendrá por efecto retardo en la germinación, que será proporcional al potencial osmótico (Porta *et al.*, 2009).

La sensibilidad de los cultivos a la salinidad varía de una fase de desarrollo. A medida que las plantas maduran, se vuelven progresivamente más tolerantes a la salinidad, particularmente en etapas avanzadas del ciclo (Trejo *et al.*, 2013). La magnitud de las respuestas de las plantas se encuentra estrechamente relacionada a la concentración de las sales, a la duración del estrés a que están expuestas y de la especie con que se trate (Goykovic y Saavedra, 2007).

5.6 Adaptación y resistencia de las plantas a la salinidad.

La existencia de plantas adaptadas a medios salinos puede servir para mejorar los suelos. El cultivo de plantas de este tipo puede resultar efectivo para hacer disminuir la salinidad o la sodicidad (fitorremediación) (Qadir *et al.*, 2002)

Atendiendo a la adaptación a los medios salinos se pueden agrupar en no halófilas, aquellas que no han desarrollado mecanismos de adaptación, y halófilas, que son las que están adaptadas a

vivir en medios salinos. Las halófilas pueden agruparse en euhalófilas, aquellas que acumulan sales en sus tejidos y son las más tolerantes a las sales; crinohalófilas, aquellas que tienen glándulas excretoras en el envés de la hoja, que les permiten eliminar soluciones altamente salinas; y las localhalófilas, que son aquellas plantas que localizan sales en estructuras especiales, con lo que controlan su distribución en los tejidos (Goykovic y Saavedra, 2007).

El término tolerancia a la salinidad resulta más específico para describir la adaptación de una especie frente a la salinidad, que el de resistencia. La resistencia o tolerancia relativa a la salinidad es la capacidad de las plantas para resistir los efectos adversos no específicos de un exceso de sales solubles en la zona radicular. Esta tiene en cuenta aspectos ecológicos (capacidad para sobrevivir), ecofisiológicos (adaptabilidad o capacidad relativa) y agrícolas (disminución del rendimiento) (Mesa, 2003).

El mecanismo por el cual las plantas toleran la salinidad cuando la concentración de sodio aumenta, está sustentado en el la actividad del intercambiador de Na^+/H^+ , el cual incrementa su actividad en las células vejiga, y en segundo lugar en los tejidos jóvenes de las hojas. La tolerancia de una especie dada no solo depende del intercambiador Na^+/H^+ , sino que también, y más importante, al tejido y el órgano donde esta actividad es mayor. La alta actividad del intercambiador esta mediada por el nivel de expresión de la proteína responsable del intercambio dentro de las células vejiga, estas células están localizadas en la superficie de las hojas y los tallos, son células modificadas, llamadas tricomas, que se desarrollan durante el crecimiento de la planta y permanecen deprimidas en ausencia de sal, pero su crecimiento se ve estimulado por la presencia de esta. Cuando el sodio es traslocado a la planta, es depositado en un gradiente a lo largo de su eje de crecimiento, con la mayor concentración depositada en las partes jóvenes de las hojas, donde es secuestrado en la gran vacuola central, como se muestra en la figura 2. Esto en contraste con lo que sucede es las glicófitas, las cuales dirigen el sodio hacia las partes maduras de la planta en un intento de mantenerlo en las raíces y no en las hojas (Bronwyn *et al.*, 2007).

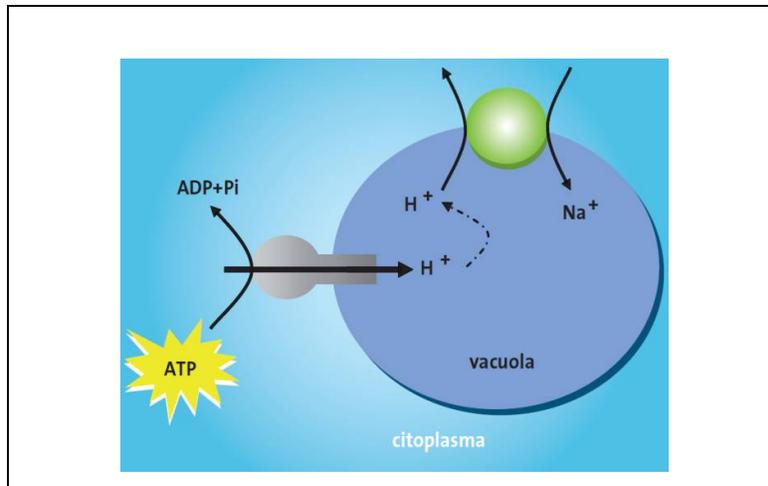


Fig. 2 Representación esquemática de la acumulación vacuolar de sodio. Fuente: Bronwyn *et al.*, 2007.

5.7 Uso de plantas tolerantes.

Las especies y variedades individuales de plantas difieren marcadamente en el contenido de sales aunque hayan crecido en las mismas condiciones. Algunas veces estas diferencias se deben a una distinta forma y tamaño de las raíces, lo cual permite a la planta explotar regiones diferentes del suelo, pero en otros casos parecen deberse únicamente a las características de absorción *per se*, debido a sus genes y a la herencia de la capacidad de absorción (Sutcliffe y Baker, 1979). Cuando no existe la posibilidad de reducir la carga de salinidad del agua en el suelo puede hacerse uso de plantas tolerantes a las sales para reducir sus concentraciones (Villafañe *et al.*, 2004).

5.8 Uso de plantas tolerantes a las condiciones provocadas en el suelo por el sodio intercambiable.

Los efectos del sodio intercambiable pueden ser directos por la interacción del sodio en la fisiología de la planta. La tolerancia de las plantas al sodio intercambiable ha sido menos estudiada que la salinidad, las plantas menos exigentes en calcio son más tolerantes al sodio intercambiable, lo que está ligado a que en los suelos sódicos el calcio puede ser un factor limitante. Hay plantas que pueden adaptarse a concentraciones altas de sodio (Villafañe *et al.*, 2004), esta tolerancia a las condiciones de sodicidad varían con la variedad, el estadio de crecimiento, las condiciones del medio y el nivel de manejo. Atendiendo a la tolerancia relativa al sodio intercambiable, los cultivos se pueden agrupar en: sensibles, aquellos cultivos que toleran

15%; semitolerantes, que soportan entre 15 y 40%, y las tolerantes, que soportan más del 40% (Porta *et al.*, 2009).

6. Fitorremediación

Con el fin de disminuir las concentraciones y los efectos que ellos conllevan al suelo, se hace uso de plantas cuyas adaptaciones morfológicas y fisiológicas (sistema radicular, excreción de sales, vía metabólica, resistencia o tolerancia a la salinidad, etc.) son convenientes para su uso como sistema fitorremediador.

La fitorremediación está basada en la implementación de técnicas de biorremediación de suelos realizadas a mediados del siglo XX. Estimula el uso potencial de los microorganismos para biodegradar contaminantes. Posteriormente devino el uso de organismos vegetales y se originó la fitorremediación (Carpena y Bernal, 2007).

La fitorremediación (*phyto*= planta y *remediación* = mal por corregir), se define como el proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, puede aplicarse ya sea *in situ* o *ex situ*. Entre los mecanismos que la llevan a cabo se encuentran: la rizodegradación, la fitoextracción, la fitodegradación y la fitoestabilización. En la rizodegradación (degradación a través de la raíz) las sustancias excretadas de manera natural, suministran nutrimentos para los microorganismos, mejorando su actividad biológica, se lleva a cabo en el suelo que rodea a las raíces; en la fitoextracción, los contaminantes son captados por las raíces (fitoacumulación), para después ser traslocados y/o acumulados hacia los tallos y hojas (fitoextracción). Cuando se lleva a cabo la fitoestabilización, las plantas limitan la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo ya que la producción en las raíces de compuestos químicos pueden adsorber y/o formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos así en la interfacer raíces:suelo (Carpena y Bernal, 2007).

El proceso de fitorremediación consiste en el metabolismo de los contaminantes dentro de los tejidos de la planta, a través de enzimas que catalizan su degradación; y en los procesos excretorios de la planta. Una vez que la planta ha alcanzado su madurez esta es desechada. Se consideran desechos orgánicos vegetales de la producción agrícola a los residuos de cosecha que están formados por los órganos aéreos y subterráneos de las plantas. También se denomina

rastrojos a los residuos de la parte aérea que permanecen en la superficie del suelo después de la cosecha. La cantidad de residuos de cosecha que se aporta a un suelo depende de la biomasa alcanzada en un ciclo de producción.

La fitorremediación es un acercamiento biológico prometedor para solucionar el problema de la contaminación con el uso de plantas superiores, combinando la ingeniería con la actividad natural. La intervención humana se puede requerir para establecer a la comunidad apropiada de plantas en el sitio o para aplicar técnicas agronómicas para realizar la degradación natural (Domínguez, 2009).

7 Biología de la especie: *Amaranthus hypochondriacus*

7.1 Generalidades de Amaranthus hypochondriacus.

Amaranthus hypochondriacus (fig. 3) es una planta domesticada entre el año 5200 a 3400 a. C. de acuerdo a primeros vestigios de semillas encontrados en el Valle de Tehuacán-Teotitlán, estado de Puebla. A partir de esta época su uso como cultivo se hizo intensivo hasta la época de los Mexicas llegando a producir de 15,000 a 20,000 t/a. Con la llegada de los españoles el cultivo fue desplazado, sin extinguirse la especie, debido a que se le relacionaba con ritos paganos religiosos. A mediados del siglo pasado aún se cultivaba en pequeñas áreas agrícolas, para 1980 su cultivo se revaloró por la sociedad por ser unos de los cereales más ricos en proteínas y minerales, además que se adapta fácilmente a diferentes condiciones agroecológicas. En la actualidad se producen 3,863.2 t/a en el Distrito federal y en los estados de México, Morelos, Oaxaca, Puebla, Querétaro y Tlaxcala (Pérez et al., 2011).



Fig. 3 Fotografía de *Amaranthus hypochondriacus*.

7.2 Características biológicas.

La planta cuenta con un metabolismo C_4 . Su raíz es de forma pivotante con abundante ramificación y múltiples raicillas delgadas. El tallo es cilíndrico y anguloso con gruesas estrías longitudinales que le dan una apariencia acanalada, cuyo grosor disminuye de la base al ápice, presenta distintas coloraciones que generalmente coincide con el color de las hojas, aunque a veces se observa estrías de diferentes colores, presenta ramificaciones que en muchos casos empiezan desde la base o a media altura y que se originan de las axilas de las hojas. Las hojas son pecioladas, sin estípulas de formas ovales, elípticas, opuestas o alternas con nervaduras prominentes en el envés, lisas o poco pubescentes de color verde o púrpura cuyo tamaño disminuye de la base al ápice, presentando borde entero, de tamaño variable de 6.5-15 cm. La inflorescencia del amaranto corresponde a panojas amarantiformes o glomeruladas muy vistosas, terminales o axilares, que pueden variar de totalmente erectas hasta decumbentes, con colores que van del amarillo, anaranjado, café, rojo, rosado, hasta el púrpura (National Research Council (U.S.) *et al*; 1984)

7.3 Ciclo de vida y fenología

Es una planta con ciclo de vida anual, se divide en doce fases fenológicas. La "emergencia" es la primera fase, la semilla tarda de 7 a 10 días a partir de la siembra en emerger; los cotiledones tienen un tamaño menor a 2 cm de largo. Se inicia el estado vegetativo con la segunda fase, llamado "dos hojas verdaderas", es cuando aparecen dos hojas verdaderas extendidas que ya

poseen forma romboidal y se encuentra en botón el siguiente par de hojas, esta fase surge de 15 a 20 días después de la siembra y se presenta un crecimiento rápido de la raíz. La tercera fase es la de "cuatro hojas verdaderas", en la que se observan dos pares de hojas verdaderas extendidas y aún están presentes las hojas cotiledonales de color verde, encontrándose en botón foliar las siguientes hojas del ápice en inicio de formación de botones en la axila del primer par de hojas; ocurre de los 25 a 30 días después de la siembra, en esta fase la plántula muestra buena resistencia al frío y sequía. La cuarta fase es la de "seis hojas verdaderas", en esta fase se observan tres pares de hojas verdaderas extendidas y las hojas cotiledonales se tornan de color amarillento; esta fase ocurre de los 35 a 45 días de la siembra, en la cual se nota claramente una protección del ápice vegetativo por las hojas más adultas, especialmente cuando la planta está sometida a bajas temperaturas y al anochecer, stress por déficit hídrico o salino. La quinta fase es la de "ramificación", se observan ocho hojas verdaderas extendidas con presencia de hojas axilares hasta el tercer nudo, las hojas cotiledonales se caen y dejan cicatrices en el tallo, también se nota presencia de inflorescencia protegida por las hojas sin dejar al descubierto la panoja, ocurre de los 45 a 50 días de la siembra. En la sexta fase la planta entra a la etapa reproductiva, esta fase es llamada "inicio de panojamiento", aquí la inflorescencia se nota que va emergiendo del ápice de la planta alrededor de un aglomeración de hojas pequeñas, las cuales van cubriendo a la panoja en sus tres cuartas partes; ello ocurre de los 55 a 60 días de la siembra, así mismo se puede apreciar amarillamiento del primer par de hojas verdaderas y se produce una fuerte elongación del tallo, así como engrosamiento. En la séptima fase, llamada de "panojamiento", la inflorescencia sobresale con claridad por encima de las hojas, notándose los glomérulos que la conforman; así mismo, se puede observar en los glomérulos de la base los botones florales individualizados, ello ocurre de los 65 a los 70 días después de la siembra. La octava fase, llamada "inicio de floración", la flor hermafrodita apical se abre mostrando los estambres separados, ocurre de los 75 a 80 días de la siembra, en esta fase es bastante sensible a la sequía y heladas; se puede notar en los glomérulos las anteras protegidas por el perigonio de un color verde limón. En la novena fase, llamada "floración" o "antesis", el 50% de las flores de la inflorescencia se encuentran abiertas, lo que ocurre de los 90 a 100 días después de la siembra. La décima fase es la de "grano lechoso", aquí los frutos que se encuentran en los glomérulos de la panoja, al ser presionados explotan y dejan salir un líquido lechoso, lo que ocurre de los 100 a 130 días de la siembra. La onceava fase es la de "grano pastoso", aquí los frutos al ser presionados presentan una consistencia pastosa de color blanco, lo que ocurre de los 130 a 160 días de la siembra. La doceava y última fase es la madurez fisiológica, aquí el grano formado es presionado por las uñas, presenta resistencia a la

penetración, Ocurre de los 160 a 180 días después de la siembra, el contenido de humedad del grano varía de 14 a 16%, el lapso comprendido de la floración a la madurez fisiológica viene a constituir el período de llenado del grano, así mismo en esta etapa ocurre un amarillamiento completo de la planta y una gran defoliación (Mujica y Quillahuaman, 1989).

7.4 Condiciones de cultivo y cosecha

La altitud no es limitación grave, se establecen desde el nivel del mar hasta los 3,200 msnm. La germinación óptima se da entre los 16 y 35° C, incrementándose en el extremo superior. Tolerancia a altas temperaturas, pero no resiste heladas, cesa el crecimiento a los 8° C y las plantas se dañan a los 4° C. Requiere alta fertilidad en el suelo (National Research Council (U.S.) *et al*; 1984). Suelos preferentemente francos, con buen drenaje y alto contenido de materia orgánica, pendientes moderadas y un contenido medio de nutrientes. Prefiere suelos neutros a básicos, ya que es tolerante a la salinidad y a la alcalinidad, puede cultivarse a un pH entre 4.5 y 9, sin embargo tiene un buen desarrollo a pH neutro. La semilla se siembra directamente sobre el campo o maceta y para que germinen y echen raíces el suelo debe tener una buena humedad, una vez establecida la plántula crecen mejor en condiciones secas y cálidas; puede germinar a concentraciones salinas de 0.52 dS^{-1m}, pudiéndose retrasar hasta 25 días su germinación (Mujica y Quillahuaman, 1989). En agricultura se cultiva en zona con precipitaciones aproximadas a los 200 mm anuales (National Research Council (U.S.) *et al*; 1984). Es adecuada para suelos en proceso de desertificación capaz de mantener producciones de 1,300- 1,500 Kg/ha de grano y de 30 t/ha materia verde en condiciones de sequía con riegos moderados en los primeros 15 días (Borroto *et al.*, 2003). Se adapta a diferentes climas desde el desértico, caluroso y seco en la costa hasta el frío y seco de las grandes altiplanicies, pasando por los valles interandinos templados y lluviosos, llegando hasta las cabeceras de la ceja de selva con mayor humedad relativa y a la puna y zonas cordilleranas de grandes altitudes (Mujica y Quillahuaman, 1989).

Justificación

Es necesario fomentar el uso de plantas tolerantes al sodio ante los problemas causados por la sodicidad en el suelo (Porta *et al.*, 2009), con el fin de fitorremediarlo, disminuyendo las concentraciones de sodio intercambiable en el suelo y aminorar el deterioro ambiental.

La alta concentración de sodio genera en el suelo problemas como la degradación de su estructura superficial, tendencia al sellado y encostramiento, deficiente desarrollo radicular, dosificación de arcillas, translocación de arcillas sódicas, colmatación de drenes enterrados, erosión y toxicidad. En las plantas, los efectos del sodio por encima de su tolerancia relativa generan toxicidad y cambios en su anatomía, morfología, fisiología y desarrollo (Porta *et al.*, 2009).

La salinidad y la sodicidad son problemas comunes en las regiones semiáridas y áridas del mundo, donde las precipitaciones son insuficientes para lixiviar las sales y el exceso de iones sodio en la zona de la rizósfera de las plantas. Además estas zonas se caracterizan por tener altas tasas de evaporación, lo que propicia un aumento en la concentración de sales en la superficie del suelo. Estos problemas están presentes en gran parte de las áreas agrícolas, en donde el problema se ha incrementado por las malas prácticas de riego y fertilización (Rueda, 2009).

En conjunto, estos problemas además de dañar la resiliencia del suelo, alteran la relación que guarda con la vegetación y con los microorganismos que él sustenta.

Problemática

Será *Amaranthus hypochondriacus* una especie acumuladora, apta para la fitoextracción de sodio en un suelo en proceso de sodificación y deteriorado por los efectos del sodio intercambiable, que generan condiciones desfavorables en las propiedades físicas y químicas del suelo, así como en la interacción entre los componentes del suelo y la planta (Garbisu *et al.*, 2007). A que concentración de sodio presentará menor porcentaje de germinación y supervivencia y se verá afectado su desarrollo.

Hipótesis

Amaranthus hypochondriacus es una planta con metabolismo C4, que trasloca el sodio de forma esencial y tolera los efectos inducidos en un suelo en proceso de sodificación; de tal forma, que puede ser empleada como herramienta de fitoextracción de sodio intercambiable en un suelo en proceso de sodificación.

Objetivo General

Evaluar la fitoextracción de sodio con *Amaranthus hypochondriacus*, desde su etapa germinativa hasta la madurez fisiológica (inicio de la floración), en un suelo en proceso de sodificación.

Objetivos particulares

- Analizar la viabilidad y germinación de las semillas de *Amaranthus hypochondriacus*.
- Evaluar el desarrollo, a través del tiempo, de *Amaranthus hypochondriacus* hasta su madurez fisiológica (inicio de floración), con respecto al testigo; tomando en cuenta los atributos de diámetro del tallo a 15 cm., altura, número de hojas, coeficiente de biomasa y porcentaje de supervivencia.
- Realizar un análisis del suelo con respecto a la fertilidad (NOM-021, RECNAT, 2000. Diario Oficial de la Federación, 2002), a través de la determinación de las propiedades físicas: (Densidad real y aparente (Ríos, 1987), porcentaje de espacio poroso (Ríos, 1987), textura (AS-09)) y químicas: (pH real(AS-02), conductibilidad eléctrica (AS-18), contenido de materia orgánica (AS-07) y C.I.C. y cationes intercambiables del suelo (AS-12).
- Realizar un análisis de las propiedades suelo con respecto a la salinidad (NOM-021, RECNAT, 2000. Diario Oficial de la Federación, 2002), a través de la obtención del extracto de saturación (AS-16), determinación del pH en el extracto de saturación (AS-02), medición de la conductividad eléctrica del extracto de saturación (AS-18); y determinación de cationes solubles en el extracto de saturación (AS-19), determinación del porcentaje de saturación de bases (PSB), relación de absorción de sodio (RAS) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (AS-21).
- Realizar un análisis de Na^+ en *Amaranthus hypochondriacus*, para calcular el factor de bioconcentración: $(FB = C_{\text{Na}^+ \text{ en tejido vegetal (raíz, parte aérea)}} / C_{\text{Na}^+ \text{ del suelo}})$, y el factor de translocación de raíz a la parte aérea: $(FT = C_{\text{Na}^+ \text{ en parte aérea}} / C_{\text{Na}^+ \text{ en raíz}})$; con una previa extracción de Na^+ (Método del acetato de amonio) de la raíz, del tallo y de la hoja. Para realizar cálculo del FB, se debe analizar el Na^+ en el suelo, con una previa digestión triácida (HNO_3 , H_2SO_4 , HCl).

- Análisis y tratamiento de datos a través de un ANDEVA, utilizando el software estadístico "StataSE 11".

Diseño experimental

Se realizó un estudio de invernadero mediante el cultivo de *Amaranthus hypochondriacus* regado con NaHCO_3 como fuente de sodicidad, el bicarbonato de sodio da lugar a condiciones menos alcalinas y por lo tanto menos tóxicas (Porta, *et al.*, 2009). La cantidad de sal requerida para las soluciones de los tratamientos se estableció de acuerdo al IV nivel (muy alto) de las clases de salinidad de agua para riego, como se muestra en la figura 1 del anexo, para los dos tratamientos se estableció una conductividad eléctrica de 1 y 4 dS^{-1}m , respectivamente; así mismo se usó agua desionizada con conductividad eléctrica igual a 0 dS^{-1}m , para el testigo. Su aplicación se llevó a cabo diariamente y de forma manual sobre el suelo comercial de las macetas a capacidad de campo, un mes antes a partir de la siembra hasta la cosecha, la cual se realizó al inicio del estado de floración, como se muestra en la figura 2 del anexo.

Se generaron dos condiciones de siembra: directa (por germinación) y una indirecta (por trasplante), para los tratamientos de 1 dS^{-1} , 4 dS^{-1}m y para el agua desionizada. La siembra indirecta se realizó un mes después de la germinación, a partir de semillas que germinaron en el bloque de testigos de siembra directa, en condiciones de invernadero y de salinidad nula, como se muestra en la figura 2 del anexo.

Al generar las dos condiciones de siembra, los dos tratamientos y los testigos se estableció un diseño para el cultivo en forma de bloques, con 15 macetas por bloque de 2.5 kg de suelo, a excepción del bloque 5 y 6, que contienen 8 y 7 macetas, respectivamente, como se muestra en la figura 3 del anexo.

Se realizó el seguimiento de *A. hypochondriacus* tomando en cuenta la altura, diámetro del tallo a la altura de 15 cm, número de hojas, el coeficiente de biomasa por individuo (que se establece como el coeficiente entre el peso y el diámetro a 30 cm por la altura) y porcentaje de supervivencia, el cual se llevó durante 13 semanas y se realizaron seis registros a través de su desarrollo en las semanas 1, 4, 7, 9, 11 y 13.

Se tomó una muestra simple del suelo comercial al inicio del experimento, antes de establecerse la siembra y una muestra compuesta del suelo de las macetas de cada uno de los seis bloques (tratamientos y testigos) al final del experimento, de las cuales se determinaron sus propiedades físicas y químicas con respecto a fertilidad y salinidad (NOM-021-RECNAT-2000; Diario Oficial de la Federación, 2002). Para el análisis de la concentración de sodio por emisión atómica, se sometieron las muestras a digestión con agua regia y posteriormente se le realizó una extracción de sodio por el método del extracto de amonio.

Se tomó una muestra compuesta de todos los individuos por bloque, las estructuras vegetales de las planta por bloque (raíz, tallo, hoja) fueron separadas, secadas al horno a 105°C y molidas en un molino eléctrico, posteriormente fueron digeridas y finalmente se analizó la concentración de sodio por el método de emisión atómica.

Se determinaron el factor de bioconcentración ($FB = C_{Na^+ \text{ en tejido vegetal (raíz, parte aérea)}} / C_{Na^+ \text{ del suelo}}$) y de translocación ($FT = C_{Na^+ \text{ en parte aérea}} / C_{Na^+ \text{ en raíz}}$), a partir de las concentraciones de sodio obtenidos en el suelo y en las estructuras vegetales de la planta (Gallegos *et al*; 2011).

Se analizaron y se trataron los datos a través de un ANDEVA, utilizando el software estadístico "StataSE 11".

Metodología

El estudio se desarrolló a través de tres fases: Fas de gabinete, de campo, de laboratorio.

1. Fase de gabinete

En esta fase se realizó la consulta de fuentes bibliográficas y se trató a los datos obtenidos en los resultados a través del análisis de varianza (ANDEVA) con la ayuda del software estadístico StataSe11.

2. Fase de campo

En esta fase se dividió en la adquisición del suelo comercial, del material biológico (semillas de *Amaranthus hypochondriacus*, obtenidas de un ejemplar maduro extraído de un plantío ubicado

en el municipio de Amecameca, Edo. de México) (fig.4) y adquisición de bolsas para la plantación.



Fig. 4 Fotografía del plantío de *A. hypochondriacus* ubicado en el municipio de Amecameca, Edo. de México.

3. Fase de Laboratorio

Esta fase se divide en el establecimiento del plantío, prueba de viabilidad de la semilla, siembra de la semilla, siembra de trasplantes, evaluación del desarrollo, análisis de la concentración de sodio en las estructuras de la planta (raíz, tallo, hoja) y el suelo; análisis físicos y químicos, con respecto a la fertilidad y salinidad en el suelo.

Establecimiento del plantío.

Se estableció el plantío de seis bloques (Reyes, 1981), debido a que se generaron dos condiciones de siembra: directa (por germinación) e indirecta (por trasplante), dos tratamientos salinos de 1dS^{-1} y $4\text{dS}^{-1\text{m}}$ y dos testigos (siembra directa e indirecta); para la siembra y desarrollo de *A. hypochondriacus* en una bancal de vivero, como se muestra en la figura 5.



Fig. 5 Fotografía del establecimiento del cultivo en bloques bajo condiciones de invernadero.

Riego.

Se realizó un riego con una solución de NaHCO_3 como fuente de sodicidad a dos conductividades eléctricas, de 1 y 4 dS^{-1}m , para generar dos tratamientos salinos; así mismo se usó agua desionizada con conductividad eléctrica igual a 0 dS^{-1}m , para regar a la par los testigos. Los riegos, tanto de sodicidad como de agua desionizada, se realizaron en cada uno de sus respectivos bloques y se iniciaron al establecer el plantío un mes antes de realizar la siembra directa, con el fin de generar condiciones salinas previas a las germinaciones y a los trasplantes, y mantener constante el efecto físico generado por el riego con agua en todos los bloques. Se regó a capacidad de campo cada tercer día, desde un mes antes de la germinación de la siembra directa hasta el fin del experimento, antes de que diera inicio la fase de floración o antesis.

Siembra, desplante y trasplante.

Se realizó una siembra directa (por germinación, fotografía A) y otra indirecta (por trasplante, fotografía B) (Hartmann y Kesler, 1994) de *A. hypochondriacus* sobre los bloques del plantío previamente establecido y regados, como se muestra en la figura 6. La siembra directa se realizó con una cantidad indefinida de semillas, al mes el individuo con mayor altura se dejó sobre la

maceta y los excedentes se desecharon debido a que no eran funcionales para los trasplantes por haber sido regados con los tratamientos; para el caso de la siembra directa del testigo, también se usó una cantidad indefinida de semillas y al mes se dejó sobre la maceta al individuo con mayor altura, pero los excedentes sirvieron para realizar los trasplantes y conocer el efecto de la salinidad sobre el desarrollo de los trasplantes germinados en salinidad cero. Los trasplantes se realizaron a partir de desplantes que germinaron en condiciones de vivero y cero salinidad del bloque de testigos de la siembra directa, un mes después de su germinación. La siembra directa se hizo sobre los bloques 3, 4 y 5, y la siembra indirecta sobre los bloques 1, 2 y 6, de acuerdo a las especificaciones de los bloques de la figura 3 del anexo.



Fig. 6 Fotografía (A): Siembra directa, germinación de semillas de *A. hypochondriacus* sobre las macetas del bloque 3, 4 y 5. Fotografía (B): Siembra indirecta, trasplante de plántulas de *A. hypochondriacus* sobre las macetas del bloque 1, 2 y 6.

Prueba de viabilidad de la semilla.

Se realizó una prueba de viabilidad con cloruro de tetrazolio (Hartmann y Kesler, 1994), para las semillas de *A. hypochondriacus*.

Prueba de Germinación.

Se hizo una prueba de germinación de las semillas en cajas Petri a conductividades eléctricas de 0, 1, 4, 6.6, 9.6, 12 dS ^{-1m} en incubadora a 25°C por cinco días como se muestra en la figura 7.



Fig. 7 Fotografía de la germinación de las semillas de *A. hypochondriacus* en 0, 1, 4, 6.6, 9.6, 12 dS ^{-1m} en incubadora a 25°C.

Evaluación del desarrollo.

Consistió en medir los atributos de la planta como son: cobertura de copa, diámetro a 30 cm de altura y altura del tallo. El número de hojas se midió directamente con el conteo de cada foliolo. El diámetro a 30 cm de altura se midió directamente con un vernier, primero a la altura de los cotiledones y posteriormente, cuando rebasó los 30 centímetros de altura. La altura del tallo se tomó directamente con un flexómetro. Se tomó también el peso con una balanza analítica para construir el índice de biomasa que se establece como el coeficiente entre el peso (fotografía A) y el diámetro a 30 cm por la altura (fotografía B) $(IB = (m / (d_{planta} * h_{planta})))$, como se muestra en la figura 8. Y por último, se determinó también el porcentaje de supervivencia.

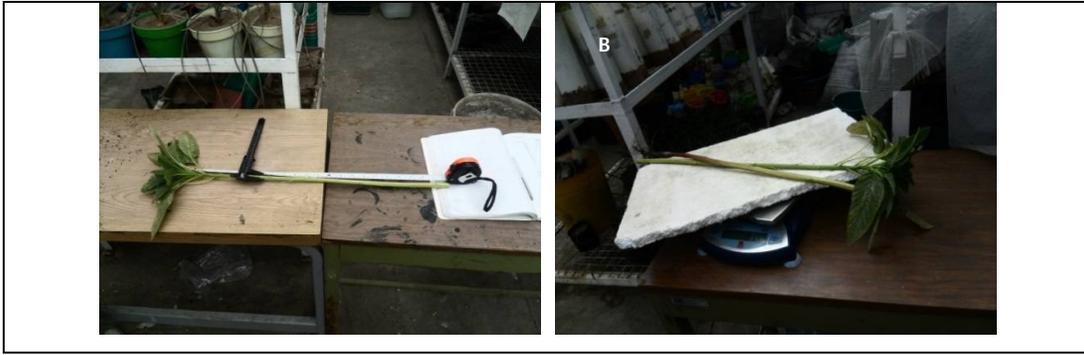


Fig. 8 Fotografías de la toma del diámetro y la altura (fotografía A) y del peso (fotografía B) de cada uno de los individuos por bloque, para construir el índice de biomasa.

El seguimiento del desarrollo de *Amaranthus hypochondriacus* se llevó durante 13 semanas, del 22 de febrero al 16 de mayo; se realizaron seis registros a través de su desarrollo en las semanas 1, 4, 7, 9, 11 y 13, como lo muestra la figura 9.



Fig. 9 Fotografías que muestran los seis registros del desarrollo de *A. hypochondriacus* en las semanas 1 (fotografía A), 4 (fotografía B), 7 (fotografía C), 9 (fotografía D), 11 (fotografía F) y 13 (fotografía G).

Cosecha.

Las plantas se retiraron antes del período de antesis (caída del polen), al inicio de la floración (figura 10) donde el desarrollo vegetativo llega al final y la planta deja de crecer.



Fig. 10 Fotografía de la espiga de *A. hypochondriacus*, que indica el límite de establecimiento y de cosecha.

Análisis de sodio de suelo y estructuras de la planta.

Análisis de la concentración de sodio en el suelo y en las estructuras de la planta (raíz, tallo, hoja, flor) por la técnica de absorción atómica, como lo muestra la figura 11 (NOM-021-RECNAT-2000. Diario Oficial de la Federación, 2002). Para el análisis de la concentración de sodio por emisión atómica se realizó una previa separación, secado al horno a 105°C, molido y digestión de la raíz, del tallo y de la hoja. Para el análisis de la concentración de sodio en el suelo por emisión atómica se le realizó una previa digestión con agua regia y una posterior extracción de sodio por el método del acetato de amonio (NOM-021-RECNAT-2000. Diario Oficial de la Federación, 2002).



Fig. 11 Fotografía que muestra el espectrofotómetro de absorción atómica donde se realizó el análisis de la concentración de sodio en suelo y del material vegetal de *A. hypochondriacus*.

Muestreo.

Muestreo simple del suelo inicial y una muestra compuesta del suelo de las macetas por cada bloque (tratamiento) al final del experimento, como se muestra en la figura 12 (AS-H1) (NOM-021-RECNAT-2000. Diario Oficial de la Federación, 2002).



Fig. 12 Fotografía que muestra la previa toma de la muestra compuesta por bloque de los suelos de cada maceta depositados en bolsas de poliuretano.

Caracterización del suelo.

Para realizar estudios con propósitos de evaluar la fertilidad y salinidad de los suelos, es necesario en primera instancia ejecutar el procedimiento de muestreo en campo recomendado para tal fin, además de la realización de una serie de determinaciones analíticas y finalmente la elaboración de las interpretaciones respectivas del análisis y su informe correspondiente (NOM-021-RECNAT-2000. Diario Oficial de la Federación, 2002).

1) Análisis físicos y químicos del suelo.

Análisis físicos.

- Cuantificación de la densidad aparente (Método de la probeta, Ríos, 1987).
- Cuantificación de la densidad real (Método del picnómetro, Ríos, 1987)
- Cuantificación del porcentaje de porosidad
- Análisis de textura (AS-09, NOM-021-RECNAT-2000).

Análisis químicos.

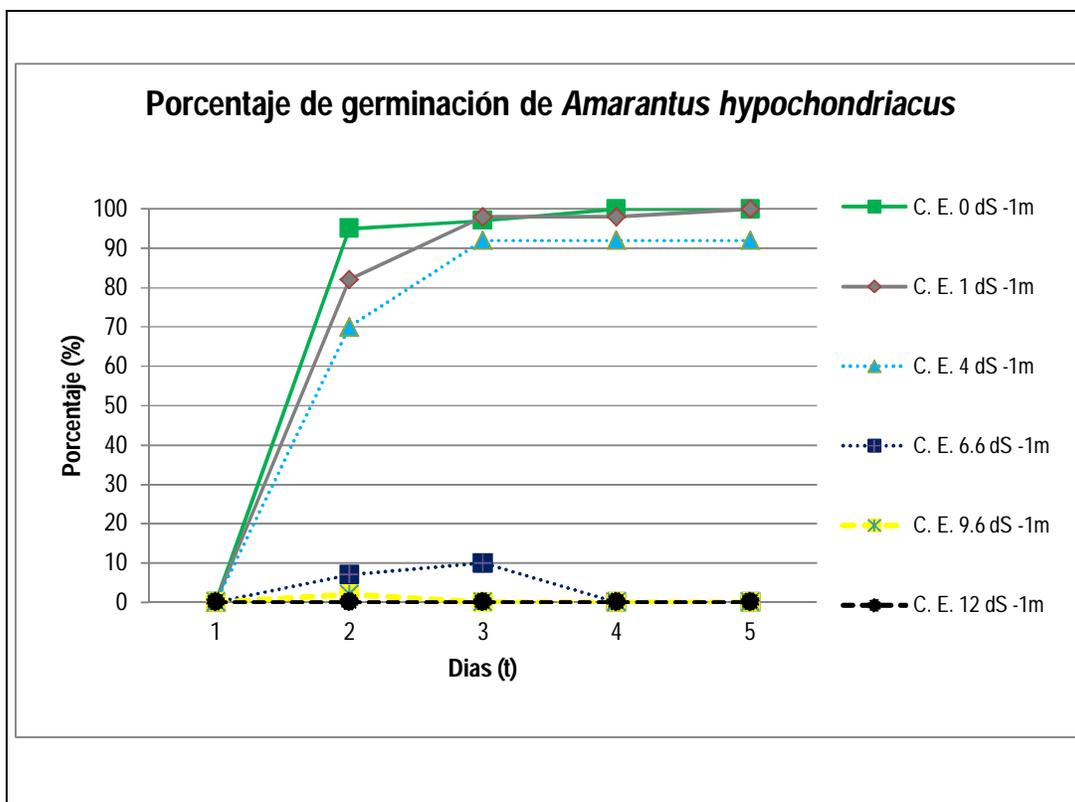
- Análisis de materia orgánica (AS-07, NOM-021-RECNAT-2000).
- Cuantificación de conductibilidad eléctrica (AS-18, NOM-021-RECNAT-2000).
- Cuantificación de pH real (AS-02, NOM-021-RECNAT-2000).
- Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables (AS-12, NOM-021-RECNAT-2000).

2) Análisis químicos del extracto de saturación.

- Obtención del extracto de saturación (AS-16, NOM-021-RECNAT-2000).
- Cuantificación del pH en el extracto de saturación (AS-02, NOM-021-RECNAT-2000).
- Cuantificación de la conductividad eléctrica del extracto de saturación (AS-18, NOM-021-RECNAT-2000).
- Análisis de cationes solubles en el extracto de saturación (AS-19, NOM-021-RECNAT-2000).
- Cuantificación del porcentaje de saturación de bases (PSB), relación de absorción de sodio (RAS) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (AS-21, NOM-021-RECNAT-2000).

Resultados

1 Germinación de semillas



Gráfica 1. Porcentaje de germinación de las semillas en los seis diferentes tratamientos en los cinco primeros días a partir de su siembra.

En la gráfica 1 se presenta el porcentaje de germinación de la semilla de *Amaranthus hypochondriacus* sembrada en seis tratamientos con conductividades de 0, 1, 4, 6.6, 9.6 y 12 dS ^{-1m} en los cinco primeros días a partir de su siembra a una temperatura constante de 25 °C.

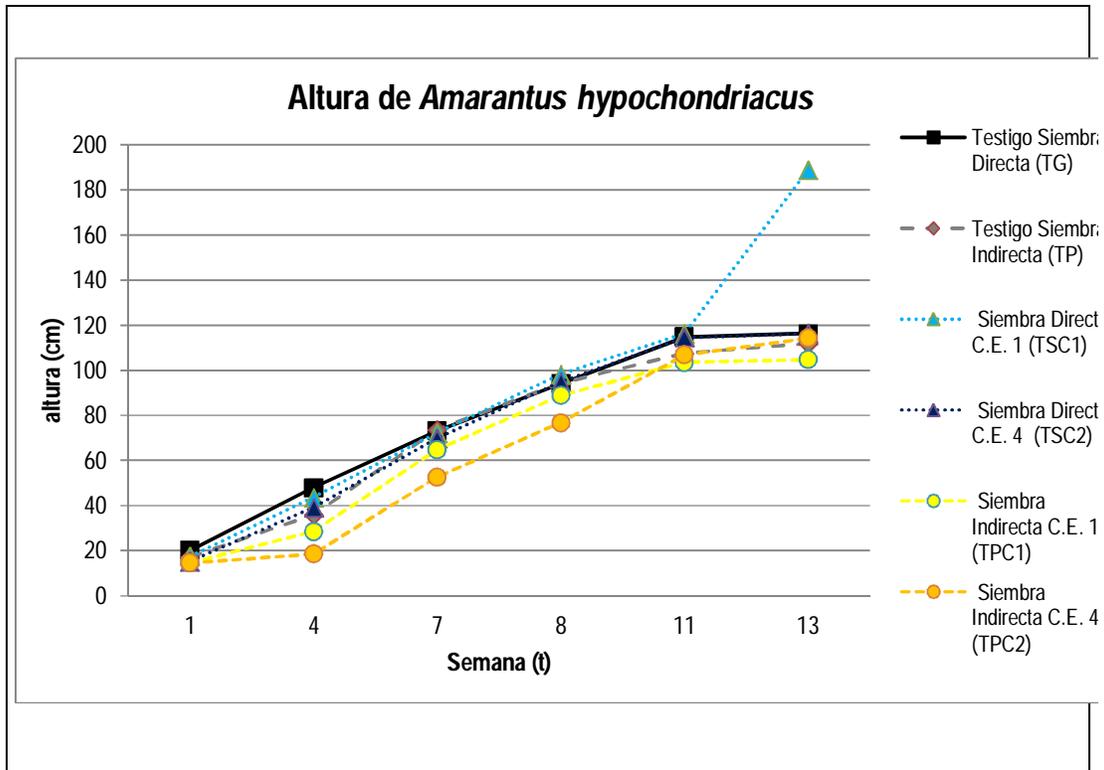
Conductividad eléctrica de los tratamientos (dS ^{-1m})	Equivalente en mg/L	Porcentaje de germinación (día)				
		1	2	3	4	5
12	12,000	0	0	0	0	0
9.6	9,600	0	2	0	0	0
6.6	6,600	0	7	10	0	0
4	4,000	0	70	92	92	92
1	1,000	0	82	98	98	100
0	0	0	95	97	100	100

Cuadro 1. Valores del porcentaje final de germinación por tratamiento de sales disueltas de NaHCO₃.

Los tratamientos con conductividades eléctricas bajas presentan valores de porcentaje de germinación más altos que los tratamientos con conductividades mayores a 6.6 % y disminuyen hasta anularse en medida que aumenta la concentración de sales disueltas de NaHCO₃.

2. Evaluación del desarrollo

El seguimiento del desarrollo de la especie se muestra a través de las gráficas de altura, diámetro del tallo a la altura de 15 cm, número de hojas y por el coeficiente de biomasa por individuo y de supervivencia. El seguimiento de *Amaranthus hypochondriacus* se llevó durante 13 semanas, del 22 de febrero al 16 de mayo; se realizaron seis registros a través de su desarrollo en las semanas 1, 4, 7, 9, 11 y 13, en dos condiciones de siembra: por germinación y por trasplante; cada condición de siembra fue regada con dos tratamientos de bicarbonato de sodio (NaHCO₃) a conductividades de 1 y 4 dS ^{-1m}. Así mismo se utilizaron testigos sembrados directa e indirectamente, regados con agua desionizada a una conductividad de 0 dS ^{-1m}.



Gráfica 2. Seguimiento de la altura de *Amaranthus hypochondriacus*.

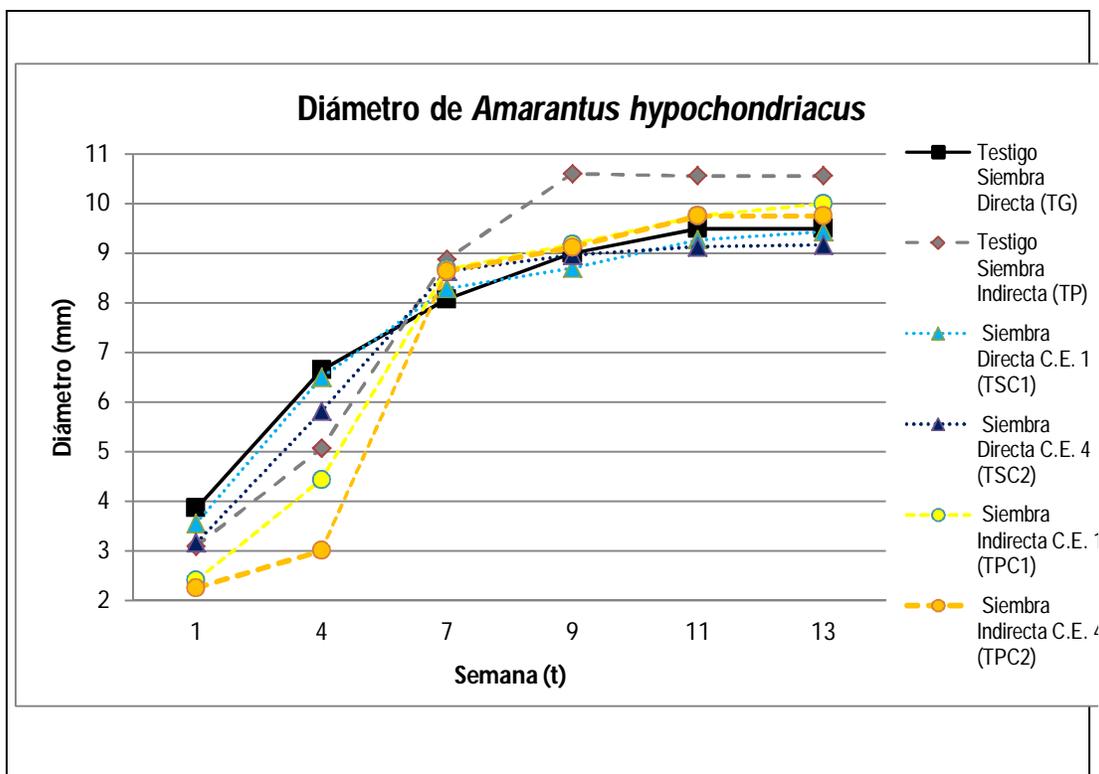
La gráfica 2 muestra el seguimiento de alturas de *Amaranthus hypochondriacus*.

Tratamiento	Altura/semana (cm)		
	4	8	13
TSC1	43.5	98.27	188.11
TG	47.7	94.14	116.9
TSC2	39.15	94.77	116.33
TPC2	18.5	76.77	114.2
TP	35.88	94.44	111.75
TPC1	28.5	88.84	104.75

Cuadro 2. Valores de la altura de *Amaranthus hypochondriacus* en los tratamientos a través del seguimiento.

La siembra directa reportó mayor altura final en comparación con las siembras indirectas, siendo el tratamiento de siembra directa con conductividad de $1 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ el límite máximo y el tratamiento de siembra indirecta con conductividad de $1 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ el límite mínimo. Tanto en la siembra directa como la indirecta el testigo se mantuvo entre el límite máximo y mínimo de los tratamientos. Por

lo tanto los valores más altos se presentan en la condición de siembra directa. De esta forma la altura se ve directamente influida por la condición de siembra y no por la concentración.



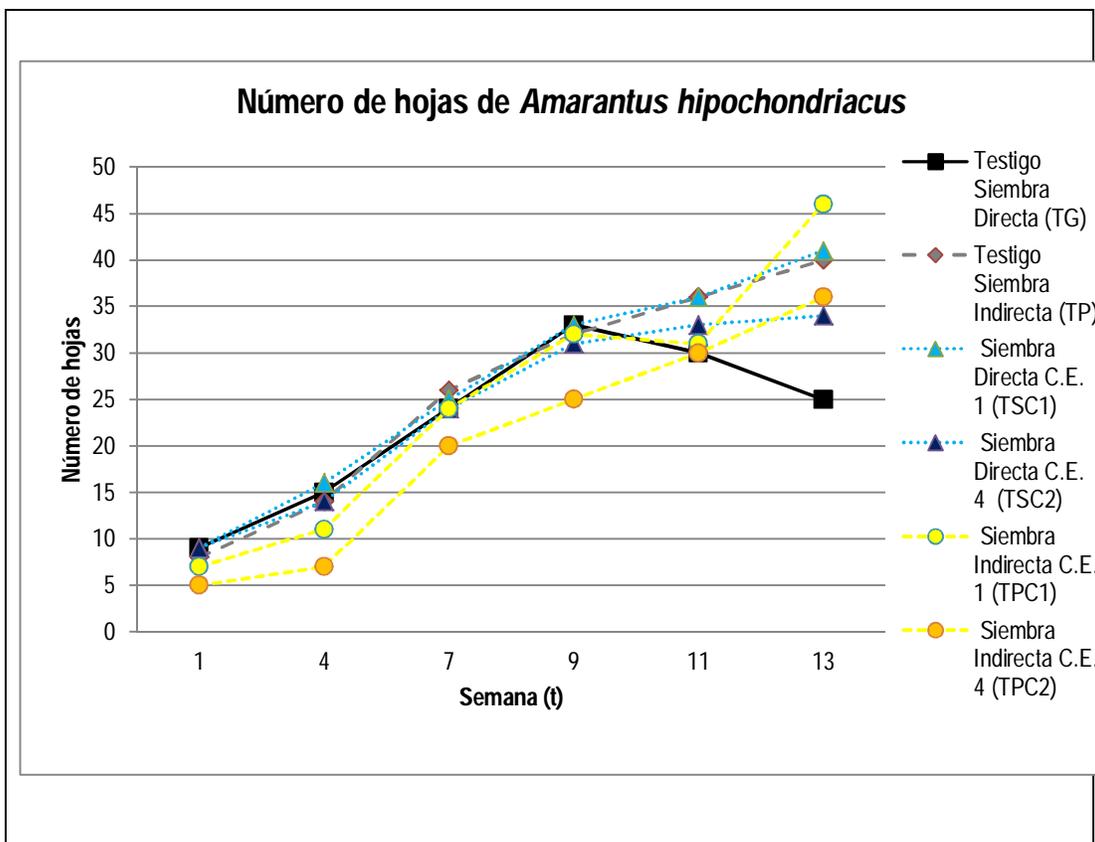
Gráfica 3. Seguimiento de los diámetros de *Amaranthus hypochondriacus*.

La gráfica 3 muestra el seguimiento de diámetros del tallo de *Amaranthus hypochondriacus*.

Tratamiento	Diámetro/semana (mm)			
	1	4	8	13
TP	3.09	5.06	10.60	10.56
TPC1	2.40	4.43	9.18	10.00
TPC2	2.25	3.00	9.12	9.75
TG	3.86	6.64	9.00	9.5
TSC1	3.55	6.50	8.70	9.43
TSC2	3.16	5.81	8.96	9.17

Cuadro 3. Valores del diámetro del tallo de *Amaranthus hypochondriacus* en los tratamientos a través del seguimiento.

En la siembra indirecta el testigo tuvo el límite máximo y los tratamientos reportaron un menor diámetro final que el testigo, el cual disminuyó a mayor concentración. De la misma forma en la siembra directa el testigo tuvo el límite máximo y los tratamientos presentaron valores por debajo del testigo, que fueron más bajos al aumentar la concentración. Por lo tanto se presentan valores más altos en la siembra indirecta que en la directa y en ambos casos tuvieron un comportamiento inversamente proporcional a la concentración. De esta forma el diámetro se ve directamente influido por el tipo de siembra y es inversamente proporcional a la concentración dentro de ambas condiciones de siembra.



Gráfica 4. Seguimiento del número de hojas de *Amaranthus hypochondriacus*.

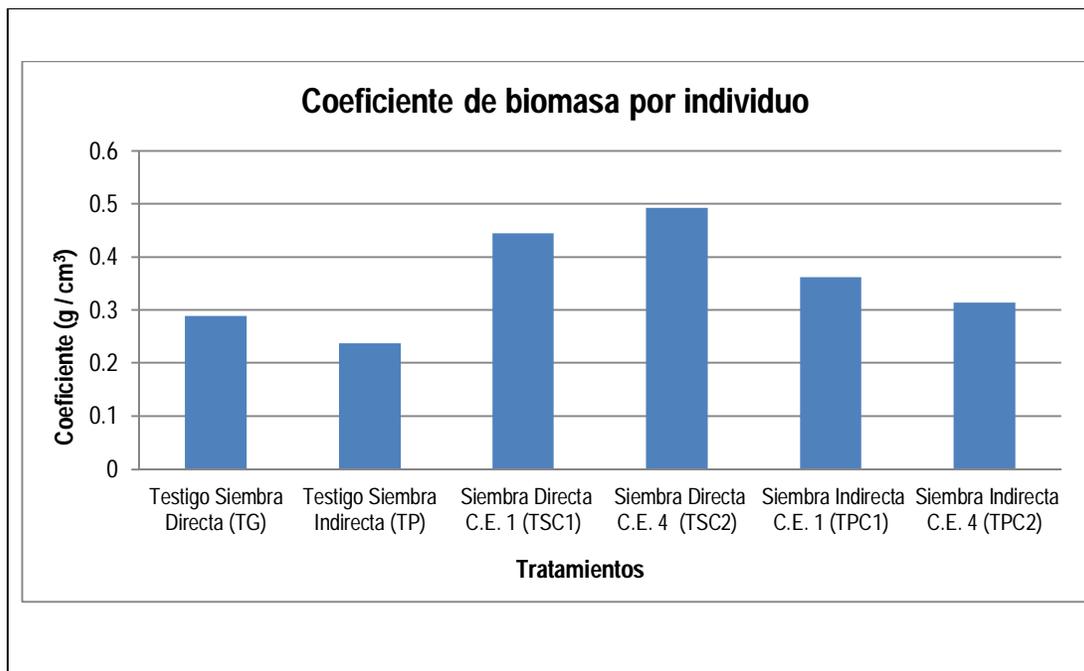
La gráfica 4 muestra el seguimiento del número de hojas de *Amaranthus hypochondriacus*.

Tratamiento	Número de hojas/semana (n)			
	1	4	8	13
TPC1	7	11	32	46
TSC1	9	16	33	41
TP	8	14	32	40

TPC2	5	7	25	36
TSC2	9	14	31	34
TG	9	15	33	25

Cuadro 4. Valores del número de hojas de *Amaranthus hypochondriacus* en los tratamientos a través del seguimiento.

El número de hojas aumenta a medida que pasa el tiempo, en tanto que otra parte cae y el número disminuye, de este modo los valores obtenidos en el número de hojas final demostró que la condición de siembra indirecta presentó valores más altos que la directa y que a concentraciones más altas de NaHCO_3 el número de hojas disminuye. Por lo tanto la concentración y la condición de siembra influyen directamente en el número de hojas.



Gráfica 5. Coeficiente de biomasa por individuo (g/cm^2) de la cosecha de *Amaranthus hypochondriacus* en los diferentes tratamientos.

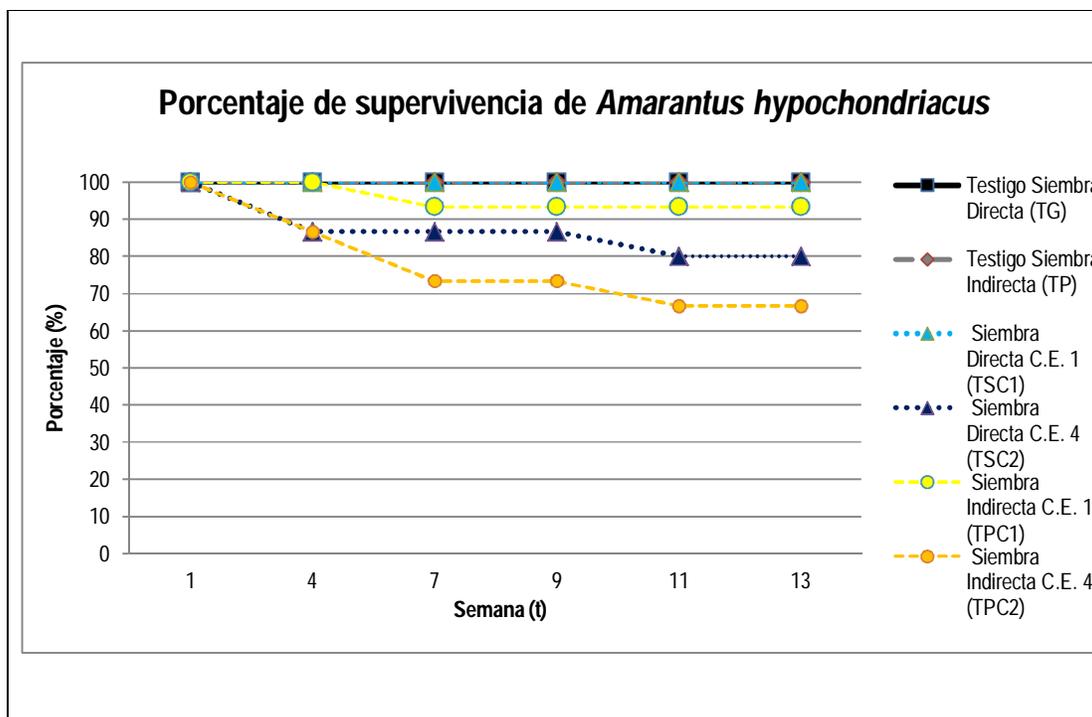
En la gráfica 5 se muestra el coeficiente de biomasa por individuo en los diferentes tratamientos

Tratamiento	Coeficiente de biomasa por individuo (g/cm^2)
TG	0.29
TP	0.22
TSC1	0.44

TSC2	0.49
TPC1	0.35
TPC2	0.31

Cuadro 5. Valores del coeficiente de biomasa por individuo de *Amaranthus hypochondriacus* en los tratamientos a través del seguimiento.

El coeficiente de biomasa está en función del peso entre el producto de los factores de altura y de diámetro. La siembra directa presentó el valor máximo, por debajo estuvo la siembra indirecta en los testigos y en los tratamientos. En cuanto a la concentración, los valores de los tratamientos con conductividad de $1 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ y de $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ dentro de cada siembra están invertidos. Por lo tanto la biomasa depende directamente del tipo de siembra y no de la concentración.



Gráfica 6. Supervivencia de *Amaranthus hypochondriacus*.

En la gráfica 6 se muestra la supervivencia de *Amaranthus hypochondriacus*.

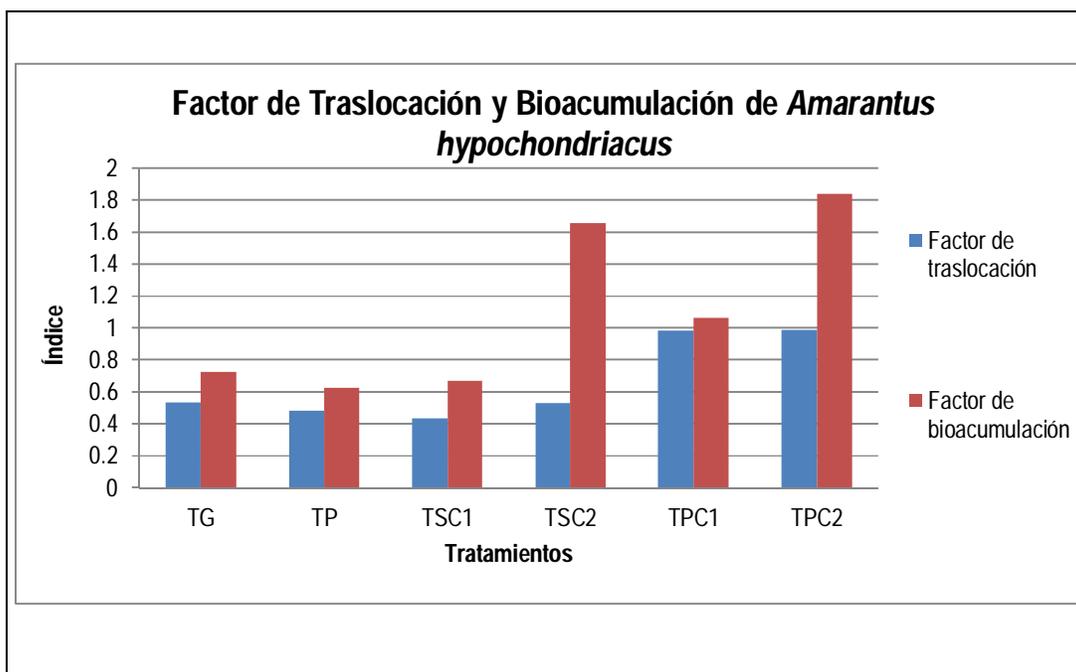
Tratamiento	Porcentaje de supervivencia (semana)			
	1	4	8	13
TG	100	100	100	100
TP	100	100	100	100

TSC1	100	100	100	100
TPC1	100	100	93.33	93.33
TSC2	100	86.66	86.66	80
TPC2	100	86.66	73.33	66.66

Cuadro 6. Valores del porcentaje de supervivencia de *Amaranthus hypochondriacus* en los tratamientos a través del seguimiento.

Los valores reportaron que el porcentaje de supervivencia disminuyó a mayor concentración de sales disueltas de NaHCO_3 , sin embargo dentro de ambos tratamientos los valores son mayores para la condición de siembra directa y menores para la indirecta. Por lo tanto el porcentaje de supervivencia se ve directamente influido por la condición de siembra y es inversamente proporcional a la concentración de sales disueltas de NaHCO_3 .

3. Factor de translocación y bioacumulación



Gráfica 7. Factor de traslocación (FT) y factor de bioacumulación (FB) de *Amaranthus hypochondriacus*. La nomenclatura usada corresponde de la siguiente manera: TG = Suelo del testigo de siembra directa TP = Suelo del testigo de siembra indirecta, TSC1= Suelo de la siembra directa con conductividad de $1 \text{ dS}^{-1\text{m}}$, TSC2 = Suelo de la siembra directa con conductividad de $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$, TPC1 = Suelo de la siembra indirecta con conductividad de $1 \text{ dS}^{-1\text{m}}$, TPC2 = Suelo de la siembra indirecta con conductividad de $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$.

En la gráfica 7 se muestra el factor de traslocación (FT) y bioacumulación (FB) en los tratamientos y los testigos al final de la fitoextracción. Por lo tanto el factor de traslocación se ve influido por el tipo de siembra y aumenta a medida que aumenta la concentración de sales solubles de NaHCO_3 .

Tratamiento	(FT) Factor de traslocación	Tratamiento	(FB) Factor de bioacumulación
TPC2	0.989	TPC2	1.838
TPC1	0.986	TSC2	1.655
TG	0.533	TPC1	1.063
TSC2	0.526	TG	0.723
TP	0.488	TSC1	0.671
TSC1	0.433	TP	0.627

Cuadro 7. Valores del factor de traslocación y bioacumulación de *Amaranthus hypochondriacus* en los tratamientos a través del seguimiento.

El factor de traslocación (FT) se ve influido por el tipo de siembra y aumenta a medida que aumenta la concentración de sales solubles de NaHCO_3 , como lo muestra los tratamientos de siembra directa con valores menores y los tratamientos de siembra indirecta con mayores; además, los valores son mayores para los tratamientos con conductividad de $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ dentro de cada condición de siembra. En el factor de bioacumulación (FB) se observa que las conductividades de $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ de las siembras directa e indirecta son mayores en comparación con las conductividades de $1 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ de ambas siembras y para los testigos también, por lo tanto el FB es directamente proporcional a la concentración de sales de NaHCO_3 .

4. Análisis físicos y químicos de fertilidad y salinidad

Se realizaron análisis físicos y químicos del suelo de conformidad para los estudios de fertilidad y salinidad de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis; y de esta misma se tomaron los criterios de clasificación para los resultados. Para ambos análisis se tomó una muestra del suelo inicial (control) donde se germinaron y se trasplantaron semillas y plántulas de *Amaranthus hypochondriacus*; así mismo se tomó una muestra compuesta de las macetas con suelos de los testigos y de los tratamientos al final de la fitoextracción.

ANÁLISIS DEL SUELO												
Análisis Físicos					Análisis Químicos							
Tratamiento	Densidad Aparente (g -1cm ³)	Densidad Real (g -1cm ³)	% de Porosidad	Textura	% M.O.	pH (H ₃ O ⁺)	C. E. (dS ^{-1m})	C.I.C. (Cmol Kg ⁻¹)	Bases Intercambiables			
									[K]	[Na]	[Ca]	[Mg]
									Cmol Kg ⁻¹	Cmol Kg ⁻¹	Cmol Kg ⁻¹	Cmol Kg ⁻¹
MI	0.95 Media	2.6 Media	63.99 Muy Alta	Franco Arenoso	3.85 Muy Bajo	8.01 Medianamente alcalino	0.66 Efecto despreciable de salinidad	35.38 Alta	2.74 Alto	23.96 Muy alto	6.18 Medio	2.5 Medio
TG	1.0 Media	2.12 Media	50.85 Alta	Franco Arenoso	3.79 Muy Bajo	8.07 Medianamente alcalino	0.45 Efecto despreciable de salinidad	36.49 Alta	6.94 Alto	20.64 Muy alto	7.1 Medio	1.81 Medio
TP	1.02 Media	2.17 Media	52.82 Alta	Franco Arenoso	2.78 Muy Bajo	8.07 Medianamente alcalino	0.43 Efecto despreciable de salinidad	38.65 Alta	5.26 Alto	18.1 Muy alto	5.65 Medio	2.74 Medio
TPC1	1.01 Media	2.22 Media	54.56 Alta	Franco Arenoso	3.2 Muy Bajo	8.39 Medianamente alcalino	0.58 Efecto despreciable de salinidad	37.73 Alta	6.61 Alto	22.71 Muy alto	12.55 Alto	2.76 Medio
TPC2	1.03 Media	2.28 Media	54.92 Alta	Franco Arenoso	2.36 Muy Bajo	8.98 Fuertemente Alcalino	0.79 Efecto despreciable de salinidad	42.09 Muy alto	5.68 Alto	21.24 Muy alto	12.74 Alto	2.43 Medio
TSC1	0.98 Media	1.93 Media	50.32 Alta	Franco Arenoso	2.87 Muy Bajo	8.44 Medianamente alcalino	0.57 Efecto despreciable de salinidad	40.68 Muy alto	5.28 Alto	19.67 Muy alto	13.16 Alto	2.57 Medio
TSC2	1.03 Media	2.06 Media	50.13 Alta	Franco Arenoso	3.29 Muy Bajo	8.73 Fuertemente Alcalino	0.82 Efecto despreciable de salinidad	38.66 Muy alto	5.74 Alto	19.2 Muy alto	11.2 Alto	2.53 Medio

Cuadro 8. Análisis físicos y químicos del suelo. La nomenclatura usada corresponde de la siguiente manera: TG = Suelo del testigo de siembra directa TP = Suelo del testigo de siembra indirecta, TSC1= Suelo de la siembra directa con conductividad de 1 dS ^{-1m}, TSC2 = Suelo de la siembra directa con conductividad de 4 dS ^{-1m}, TPC1 =

Suelo de la siembra indirecta con conductividad de $1 \text{ dS}^{-1}\text{m}$, TPC2 = Suelo de la siembra indirecta con conductividad de $4 \text{ dS}^{-1}\text{m}$.

En la cuadro 8 se muestran los resultados obtenidos de los análisis físicos y químicos de conformidad para la determinación de la fertilidad del suelo inicial (control), de los testigos y de los tratamientos. Los criterios se obtuvieron de la NOM-021-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis; en el caso de la densidad aparente y porcentaje de porosidad se tomaron de acuerdo a Flores y Alcalá, 2010 y la densidad real fue tomado de Reyes, 1996. El criterio de sodio intercambiable fue tomado de INIFAP, 2001.

Dentro de los análisis físicos, el suelo original (MI) los análisis señalaron que la densidad aparente es **media** y permaneció **constante** en los testigos y todos los tratamientos. La densidad real es **media** en los testigos y todos los tratamientos. El suelo inicial reportó un porcentaje de porosidad **muy alto**, que disminuyó a **alta** en los testigos y en todos los tratamientos. La textura del suelo inicial resultó ser **franco arenoso** y se mantuvo igual en el control, los testigos y los tratamientos.

Dentro de los análisis químicos, los niveles de materia orgánica resultaron ser **muy bajos** en el suelo inicial, y se mantuvieron constantes en los testigos y en los tratamientos. Con respecto al pH el suelo inicial resultó ser **medianamente alcalino**, se mantuvo constante en los testigos y los tratamientos TPC1 y TSC1; los tratamientos TPC2 y TSC2 son **fuertemente alcalinos**. La C.E. resultó tener **efectos despreciables de salinidad** en el suelo inicial, se mantuvo constante en los testigos y de todos los tratamientos. La C.I.C. total resultó ser **alta** en el suelo inicial y se mantuvo constante en los testigos y en los tratamientos TPC1 y TSC1; en los tratamientos TPC2 y TSC2 resultó ser **muy alta**. Con respecto a las bases intercambiables al K resultó tener una concentración **alta** en el suelo inicial, en los testigos y en todos los tratamiento; el Ca resultó tener una concentración **alta** en el suelo inicial, en los testigos y en los tratamiento TPC1 y TPC2 la concentración fue **baja**, en TSC1 y TSC2 la concentración fue **media**; el Mg reportó una concentración **alta** en el MI, TG, TP, TPC1, TPC2, TSC1, TSC2.

ANÁLISIS DEL EXTRACTO DE SATURACIÓN													
Tratamiento	pH Extracto de Saturación (H ₃ O ⁺)	C.E. Extracto de Saturación (dS ^{-1m})	Determinación de cationes solubles en el extracto de saturación				Determinación de aniones solubles en el extracto de saturación				% de saturación de bases (Cmol(+) Kg ⁻¹)	Relación de Absorción de sodio mmol L ⁻¹	% de sodio intercambiable (Cmol(+) Kg ⁻¹)
			K soluble mmol L ⁻¹	Na soluble mmol L ⁻¹	Ca soluble mmol L ⁻¹	Mg soluble mmol L ⁻¹	m mol (-) L ⁻¹ de CO ₃	m mol (-) L ⁻¹ de HCO ₃	M mol (-) L ⁻¹ de Cl	me de SO ₄			
MI	7.88 Medianamente alcalino	2.34 Moderadamente Salino	9.84 Alto	20.8 Muy alto	11.96 Alto	14.93 Alto	6	0	6.33	0.84	100 Saturado	5.67	67.72 Alto
TG	8.47 Medianamente alcalino	1.12 Muy ligeramente Salino	2.43 Alto	15.44 Muy alto	4.31 Bajo	4.99 Alto	7	0	2.67	1.16	100 Saturado	7.15	53.40 Alto
TP	8.2 Medianamente alcalino	1.10 Muy ligeramente Salino	1.85 Alto	17.1 Muy alto	4.35 Bajo	5.73 Alto	8	0	4	1.38	100 Saturado	7.62	49.60 Alto
TPC1	8.62 Fuertemente alcalino	1.77 Muy ligeramente Salino	2.46 Alto	25.52 Muy alto	4.63 Bajo	4.13 Alto	16	0	5.33	5.86	100 Saturado	12.19	60.19 Alto
TPC2	8.85 Fuertemente alcalino	2.47 Moderadamente Salino	2.23 Alto	28.77 Muy alto	4.14 Bajo	4.03 Alto	20	0	6.5	5.88	100 Saturado	14.23	49.51 Alto
TSC1	8.72 Fuertemente alcalino	1.21 Muy ligeramente Salino	2.78 Alto	26.86 Muy alto	5.56 Medio	9.12 Alto	24	0	3.33	3.21	100 Saturado	9.91	48.35 Alto
TSC2	8.75 Fuertemente alcalino	2.71 Moderadamente Salino	4.22 Alto	33.77 Muy alto	6.34 Medio	5.68 Alto	27	0	7.67	5.72	100 Saturado	13.77	49.69 Alto

Cuadro 9. Análisis de la salinidad del extracto de saturación. La nomenclatura usada corresponde de la siguiente manera: TG = Suelo del testigo de siembra directa TP = Suelo del testigo de siembra indirecta, TSC1= Suelo

de la siembra directa con conductividad de 1 dS \cdot $^{-1m}$, TSC2 = Suelo de la siembra directa con conductividad de 4 dS \cdot $^{-1m}$, TPC1 = Suelo de la siembra indirecta con conductividad de 1 dS \cdot $^{-1m}$, TPC2 = Suelo de la siembra indirecta con conductividad de 4 dS \cdot $^{-1m}$.

En la cuadro 9 se muestran los resultados obtenidos de los análisis químicos de conformidad para la determinación de la salinidad del suelo inicial, de los testigos y de los tratamientos, los criterios fueron obtenidos de la NOM-021-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis; la relación de absorción de sodio (RAS), el porcentaje de saturación de bases (PSB), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y fueron tomados de Ríos, 1987.

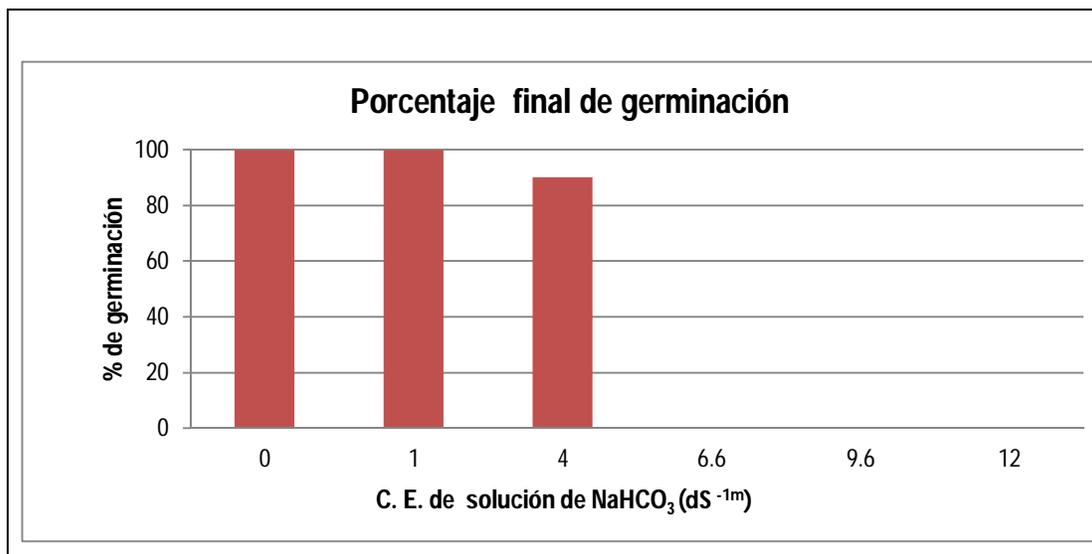
En el suelo inicial (MI) los análisis señalaron que el pH es **medianamente alcalino** y se mantuvo constante en los testigos; para todos los tratamientos el pH aumentó a **alcalinidad fuerte**.

Con respecto a la conductividad eléctrica MI reportó **salinidad moderada**, que se mantuvo constante en los tratamientos TPC2 y TSC2 reportaron; TG, TP, TPC1, TSC1 disminuyeron a **salinidad muy ligera**.

Para determinación de cationes solubles en el extracto de saturación el K^+ y Mg^{2+} se reportó un valor **alto** para el suelo inicial, que se mantuvo constante en los testigos y los tratamientos. Para Ca el valor fue **alto** para MI, disminuyó **medio** para TSC1 y TSC2 y a **bajo** para los testigos y los tratamientos TPC1 y TPC2.

Discusión de resultados

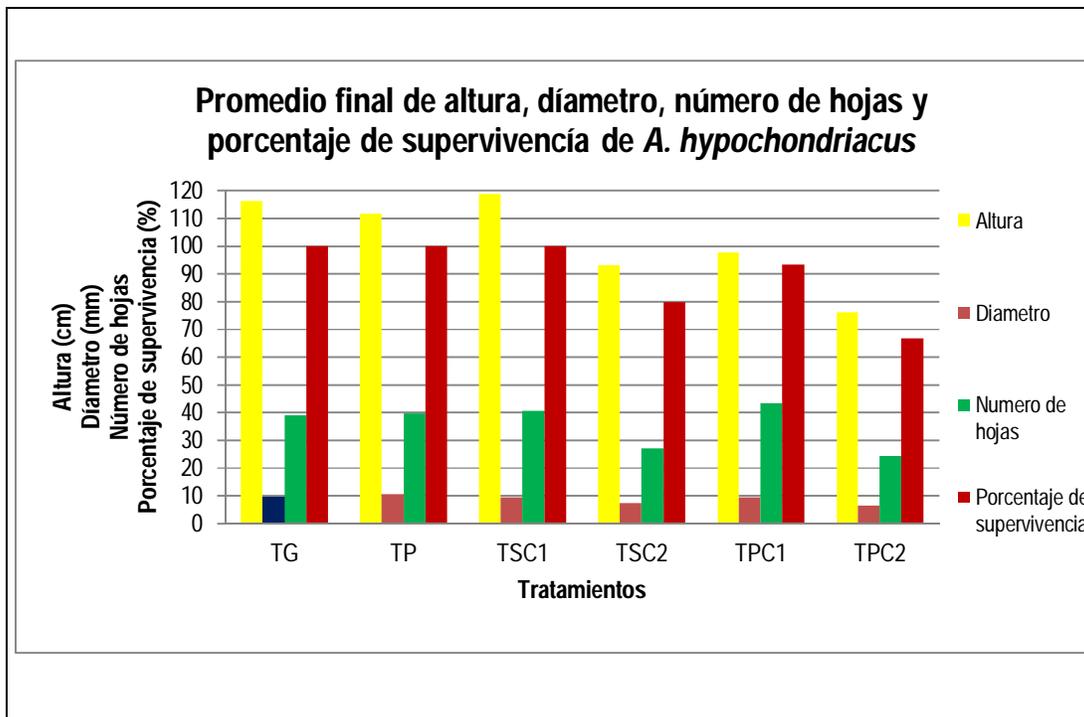
Los resultados obtenidos en el porcentaje final de germinación de semillas de *Amaranthus hypochondriacus* en una incubadora a 25 °C para el quinto día, indicaron que a mayor concentración de bicarbonato de sodio (NaHCO_3) en el agua de riego, el porcentaje de germinación disminuye, como se muestra en la gráfica 8.



Gráfica 8. Porcentaje final de germinación de semillas de *A. hypochondriacus*.

En la gráfica 8 el porcentaje de germinación de las semilla fue del 100% para el tratamiento con C.E. de 0 dS^{-1}m equivalente a 0 mg L^{-1} de sales disueltas de NaHCO_3 . El tratamiento con C.E. de 1 dS^{-1}m equivalente a 1,000 mgL^{-1} de sales disueltas de NaHCO_3 fue del 100%. Del 90% para el tratamiento de 4 dS^{-1}m equivalente a 4,000 mg L^{-1} de sales disueltas de NaHCO_3 . En contraste, el porcentaje final de germinación fue del 0% para los tratamientos de 6.6 dS^{-1}m equivalente a 6,600 mgL^{-1} de sales disueltas de NaHCO_3 , 9.6 dS^{-1}m equivalente a 9,600 mg L^{-1} de sales disueltas de NaHCO_3 y 12 dS^{-1}m equivalente a 12,000 mg L^{-1} de sales disueltas de NaHCO_3 . El porcentaje de germinación disminuye hasta anularse en medida que aumenta la concentración de sales disueltas de NaHCO_3 . De acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación de Camejo y Torres, 2000, el porcentaje final de germinación de las semillas de jitomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill), germinadas en cajas Petri, se vio significativamente reducido con el incremento de la salinidad por cloruro de sodio (NaCl). Legaría *et al.*, 2000 demostró, que la inhibición de la germinación de las semillas de *A. hypochondriacus* germinadas en cajas Petri,

es dependiente del potencial osmótico ejercido por el NaCl y puntualizó que la exposición de las semillas a concentraciones altas de NaCl u otros agentes osmóticos, como el NaHCO₃, pueden bloquear su habilidad germinativa al inducir cambios en actividades metabólicas asociadas a diferentes fases del proceso de germinación, sumado a un efecto tóxico iónico. De forma natural, en suelos con problemas de sales es frecuente que haya una inhibición en la germinación de las semillas (Porta *et al.*, 2009), este efecto se corresponde con los resultados obtenidos en germinaciones de semillas de *L. esculentum*, Mill y *A. hypochondriacus* en cajas Petri regadas con NaCl realizadas por Camejo y Torres, 2000 y Legaría *et al.*, 2000; y los obtenidos en el presente trabajo realizados con NaHCO₃ como fuerte alternativa de salinidad, en semillas de *A. hypochondriacus* germinadas en cajas Petri. Por lo tanto esta etapa de desarrollo se ve directamente influida por el efecto provocado por la salinidad o por la sodicidad.



Grafica 9. Promedio final altura, diámetro, número de hojas y porcentaje de supervivencia de *Amaranthus hypochondriacus*. La nomenclatura usada corresponde de la siguiente manera: TG = Suelo del testigo de siembra directa TP = Suelo del testigo de siembra indirecta, TSC1= Suelo de la siembra directa con conductividad de 1 dS ·⁻¹m, TSC2 = Suelo de la siembra directa con conductividad de 4 dS ·⁻¹m, TPC1 = Suelo de la siembra indirecta con conductividad de 1 dS ·⁻¹m, TPC2 = Suelo de la siembra indirecta con conductividad de 4 dS ·⁻¹m.

En la gráfica 9 se muestra el promedio final de altura, de diámetro, del número de hojas y del porcentaje de supervivencia de *Amaranthus hypochondriacus*. El análisis de datos del desarrollo

de la altura final de *Amaranthus hypochondriacus* mostró diferencias estadísticamente significativas entre altura y tratamientos, al igual que interacción altura y tratamientos, con un grado de significancia = 0.05. De acuerdo al análisis al menos dos medias son diferentes y la comparación múltiple propone que es entre el tratamiento de siembra indirecta con conductividad de 4 dS^{-1m} y siembra directa con conductividad de 1 dS^{-1m}. La altura se ve directamente influida por la condición de siembra e inversamente a la concentración, en condición de siembra directa y a menor conductividad la altura es mayor.

El análisis de datos del desarrollo del diámetro final de *Amaranthus hypochondriacus* mostró diferencias estadísticamente significativas entre diámetro y tratamientos, al igual que interacción diámetro y tratamientos, con un grado de significancia = 0.05 De acuerdo al análisis al menos dos medias son diferentes y la comparación múltiple propone que es entre el tratamiento de siembra indirecta con conductividad de 4 dS^{-1m} y el testigo de la siembra indirecta. El diámetro del tallo es inversamente proporcional a la concentración.

El análisis de datos del desarrollo del número de hojas final de *Amaranthus hypochondriacus* no mostró homocedasticidad entre los tratamientos con un grado de significancia > 0.05. Debido a esto se realizó un análisis de varianza de Kruskal-Wallis donde los datos del desarrollo del número de hojas final mostraron diferencias estadísticamente significativas entre número de hojas y los tratamientos. De acuerdo al análisis al menos dos medias son diferentes y la comparación múltiple propone que es entre el tratamiento de siembra indirecta con conductividad de 4 dS^{-1m}, siembra directa con conductividad de 1 dS^{-1m} y el tratamiento de siembra indirecta con conductividad de 1 dS^{-1m}. La condición de siembra influyen directamente en el número de hojas y el numero de hojas concentración es inversamente proporcional a la concentración.

El promedio final del porcentaje de supervivencia obtenido a través de la prueba exacta de Fisher con un grado de significancia = 0.01. El porcentaje de supervivencia se ve directamente influido por la concentración, de tal manera que a menor concentración el porcentaje de supervivencia aumenta. Esto indica que los efectos del suelo inducidos por el sodio intercambiable adicionado como agua de riego, generan problemas en la supervivencia de las plantas (Porta *et al.*, 2009) y serán abordados en la parte de análisis de suelo.

Los resultados obtenidos en el desarrollo de los cultivos a través del tiempo bajo los tratamientos de siembra directa e indirecta con conductividad de 1 y de 4 dS^{-1m} fueron comparados con el

ciclo de vida y fases fenológicas de *A. hypochondriacus* sembrado en el campo, reportado en el trabajo realizado por Mujica y Quillahuaman, 1989; encontrando que el ciclo de vida se extendió de 9 a 15 días más en el presente estudio, que el reportado por estos autores, sin haber diferencias significativas entre ambos experimentos como se muestra en la cuadro 10. En la figura 13 se aprecian las imágenes progresivas de las fases fenológicas que corresponden al plantío de *A. hypochondriacus* realizado en el presente trabajo.

Fases fenológicas (Mujica y Quillahuaman, 1989)	Tiempo en días a partir de la siembra A. <i>hypochondriacus</i> (Mujica y Quillahuaman, 1989)	Tiempo en días a partir de la siembra A. <i>hypochondriacus</i> en el experimento de vivero
Emergencia	7 – 10	4
Dos hojas verdaderas	15 -20	21
Cuatro hojas verdaderas	25-30	41
Seis hojas verdaderas	35 – 45	55
Ramificación	45 – 50	60
Inicio de panojamiento	55 – 60	70
Panojamiento	65 – 70	79
Inicio de floración	75 – 80	Fin del experimento
Floración o antesis	90 – 100	
Grano lechoso	100 – 130	
Grano pastoso	130 -160	
Madurez fisiológica	160 – 180	

Cuadro 10. Comparación de los tiempos del ciclo de vida y las fases fenológicas de *A. hypochondriacus*.

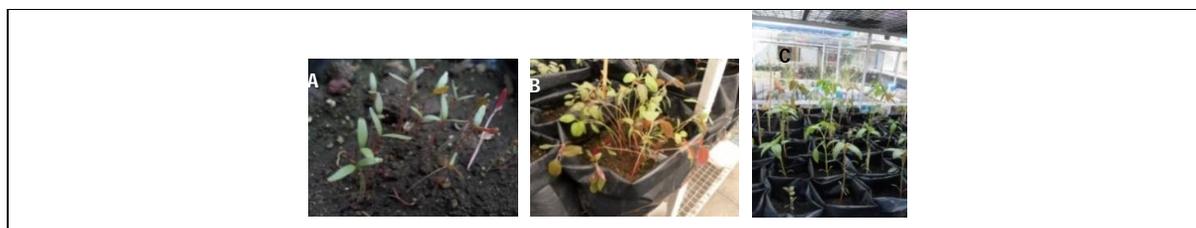
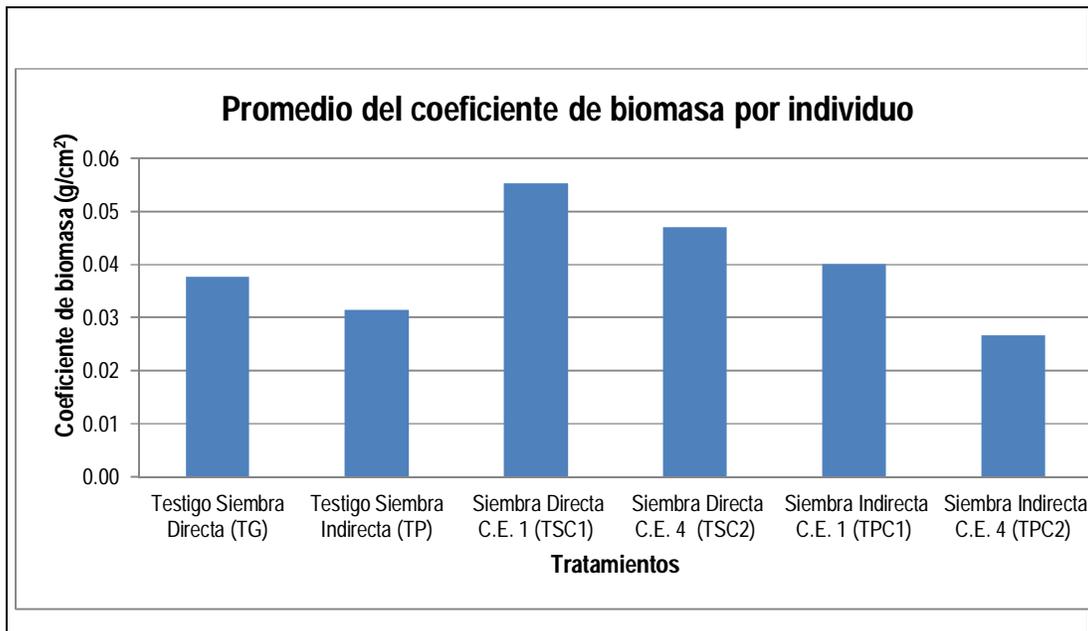




Figura 13. Fotografías que muestran el progreso de las fases fenológicas de *A. hypochondriacus*. Foto A: Fase de emergencia; Foto B: Fase de dos hojas verdaderas; Foto C: Fase de cuatro hojas verdaderas; Foto D: Fase de seis hojas verdaderas; Foto E: Fase de ramificación; Foto F: Fase de inicio de panojamiento; Foto G: Fase de panojamiento.



Gráfica 10. Coeficiente de biomasa por individuo (g/cm²) de la cosecha de *Amaranthus hypochondriacus* en los diferentes tratamientos.

La gráfica 10 se muestra el promedio del coeficiente de biomasa por individuo en los diferentes tratamientos obtenidos del análisis de varianza. El análisis de datos del índice de biomasa de *Amaranthus hypochondriacus* mostró diferencias estadísticamente significativas entre biomasa y tratamientos, al igual que en la interacción del coeficiente de biomasa y tratamientos, con un grado de significancia = 0.05. De acuerdo al análisis al menos dos medias son diferentes y la comparación múltiple propone que es entre el tratamiento de siembra directa de 1 dS^{-1m} y testigo de siembra indirecta, entre el tratamiento de siembra indirecta de 4 dS^{-1m} y testigo de

siembra indirecta, siembra directa de 1 dS^{-1m}, siembra directa de 4 dS^{-1m} y siembra indirecta de 4 dS^{-1m}. En los tratamientos de la siembra directa se obtuvo con los coeficientes máximos, 0.055 g/cm² para el tratamiento de 1 dS^{-1m} y de 0.047 g/cm² para el tratamiento de 4 dS^{-1m}, por debajo se encontraron los tratamientos de las siembras indirectas con 0.040 g/cm² para el tratamiento de 1 dS^{-1m} y de 0.027 g/cm² para el tratamiento de 4 dS^{-1m}. Para los testigos el coeficiente fue de 0.038 g/cm² para la siembra directa y de 0.031 g/cm² para la siembra indirecta. El promedio final del coeficiente de biomasa obtenido del análisis de varianza con un grado de significancia = 0.05, se ve directamente afectada por la condición de siembra y la concentración, obteniendo promedios más altos en las siembras directas y en conductividades bajas. Lo que indica que el trasplante generó un efecto sobre la disminución del crecimiento de la planta inducido por el estrés fisiológico que produce déficit de agua y reducción de crecimiento al afectar la fotosíntesis (Mohedano *et al.*, 2004). La reducción del crecimiento en los tratamientos de 4 dS^{-1m} se debe a factores inducidos por el suelo con presencia de sales solubles, principalmente de sodio y se abordaran posteriormente.

Existe una escala para el uso general cuando se desea evaluar el efecto de las sales solubles en los cultivos y muestra la relación de la respuesta del cultivo a la salinidad del suelo expresado en términos de conductividad eléctrica del extracto de saturación y es la siguiente: de 0 a 2 = efectos despreciables de la salinidad, de 2 a 4 = Los rendimientos de cultivos muy sensibles puede ser restringido, de 4 a 8 = Rendimientos de muchos cultivos son restringidos, de 8 a 16 = Solo cultivos tolerantes rinden satisfactoriamente, > 16 = Muy pocos cultivos tolerantes rinde satisfactoriamente (Allison *et al.* 1977). Los resultados obtenidos en el desarrollo de los cultivos bajo los tratamientos de siembra directa e indirecta con conductividad de 1 y de 4 dS^{-1m} fueron comparados de acuerdo a esta escala y se consideran como de "efectos despreciables de la salinidad para el cultivo" y como de "restricción del rendimiento de muchos cultivos", respectivamente. Para los cultivos desarrollados entre 0 y 2dS^{-1m} la salinidad es nula y el desarrollo es normal para todos. Para los cultivos desarrollados entre 4 y 8dS^{-1m} la salinidad es moderada y el desarrollo de la mayoría de los cultivos se ve afectado, solo se pueden desarrollar plantas tolerantes. Así *A. hypochondriacus* presentó cierta tolerancia a los tratamientos de 1 y de 4 dS^{-1m}.

Se realizó un análisis nutrimental de sodio en el suelo y en las estructuras de la planta (raíz, tallo, hoja) para calcular el factor de traslocación y de bioacumulación.

Un factor de traslocación (FT) cercano a 1, indica que se produce una traslocación de la raíz a la parte aérea, lo cual es característico de las plantas acumuladoras. Mientras, el valor de FT 0.1 señala que existe una exclusión del metal dentro del tejido de la planta (Gallegos *et al*, 2011). Como se indica en la tabla 11, en la condición de siembra directa con conductividad 1 dS^{-1m} y 4 dS^{-1m} *Amaranthus hypochondriacus* presenta características de acumuladora, por lo tanto a mayor concentración de sales en el suelo, estas son traslocadas a la parte aérea en mayor cantidad.

La especie vegetal, con un factor de bioacumulación (FB) cercano a 1, tiene mayor capacidad de liberar los elementos del suelo y acumularlos en su estructura (Katagiri, 2012). Como se indica en la tabla 11 en los tratamientos de 4 dS^{-1m} y en el tratamiento de siembra indirecta de 1 dS^{-1m} el FB es mayor a 1 y en el tratamiento de siembra directa de 1 dS^{-1m}, al igual que en los testigos es menor a 1. Por lo tanto a mayor concentración de sales en el suelo estas son liberadas y bioacumuladas en mayor cantidad en la parte aérea.

Tratamiento	Factor de traslocación (Gallegos, <i>et al</i> , 2011)		Factor de bioacumulación (Katagiri, 2012)	
	Valor	Interpretación	Valor	Interpretación
TG	0.533004423		0.72255535	
TP	0.480852481		0.62700825	
TSC1	0.433325812		0.67126879	
TSC2	0.526498627		1.65574187	Bioacumuladora
TPC1	0.986052999	Acumuladora	1.06315789	Bioacumuladora
TPC2	0.989453688	Acumuladora	1.83803845	Bioacumuladora

Cuadro 11. Valores y criterios de factor de traslocación y bioacumulación de *Amaranthus hypochondriacus*. La nomenclatura usada corresponde de la siguiente manera: MI = suelo inicial (control), TG = Suelo del testigo de siembra directa TP = Suelo del testigo de siembra indirecta, TSC1= Suelo de la siembra directa con conductividad de 1 dS^{-1m}, TSC2 = Suelo de la siembra directa con conductividad de 4 dS^{-1m}, TPC1 = Suelo de la siembra indirecta con conductividad de 1 dS^{-1m}, TPC2 = Suelo de la siembra indirecta con conductividad de 4 dS^{-1m}.

Los resultados obtenidos en las determinaciones de análisis los físicos y químicos de conformidad con el fin de evaluar la fertilidad del suelo, al inicio y final del experimento, son discutidos primero y por separado de los obtenidos en las determinaciones de conformidad para evaluar la salinidad.

La DA considera el volumen total, tanto el espacio ocupado por sólidos como el ocupado por los poros, así en los suelos sus valores oscilan entre 0.85 y 1.99 g/cm³, los valores que oscilan entre 1.5 y 1.6 g/cm³ corresponde a cierto grado de compactación, a valores entre 1.7 y 1.9 g/cm³ existe resistencia radicular (Ríos, 1987). Los valores obtenidos en la muestra inicial (0.95 g/cm³), los testigos de siembra directa (1.0 g/cm³) e indirecta (1.02 g/cm³), los tratamientos de siembra directa con conductividad de 1 dS^{-1m} (0.98 g/cm³) y de 4 dS^{-1m} (1.03 g/cm³) y los tratamientos de siembra indirecta con conductividad de 1 dS^{-1m} (1.01 g/cm³) y de 4 dS^{-1m} (1.03 g/cm³) se encontraron dentro del intervalo normal y no presentaron cambios notables que modifiquen el criterio "medio" en todos, sin embargo los valores de DA aumentan. El cambio de los valores se debe a cambios en la textura, grado de compactación, estructura y porcentaje de materia orgánica (Ríos, 1987).

Los valores no exceden los 2.65 g/cm³ en suelos minerales y de 1.2 a 1.5 g/cm³ en suelos con horizontes orgánicos y vítreos (Reyes, 1996). Los valores obtenidos en el experimento indican que la muestra inicial tiene un valor igual (2.65 g/cm³) que los valores reportados por Reyes, 1996, en suelos y los testigos al igual que los tratamientos reportaron valores más bajos, que van de 1.93 g/cm³ para tratamiento de siembra directa con conductividad de 1 dS^{-1m}, 2.06 g/cm³ para tratamiento de siembra directa con conductividad de 4 dS^{-1m}, 2.12 g/cm³ para testigo de siembra directa, 2.17 g/cm³ para testigo de siembra indirecta, 2.22 g/cm³ para tratamiento de siembra indirecta con conductividad de 1 dS^{-1m}, 2.28 g/cm³ para tratamiento de siembra indirecta con conductividad de 4 dS^{-1m} y de 2.28 g/cm³ para el suelo inicial, de esta forma el criterio de la DR se mantuvo "media" desde el inicio hasta el final del experimento en todos los tratamientos al igual que en los testigos. Sin embargo, en algunos tratamientos los valores disminuyeron.

De acuerdo a Ríos, 1987, la densidad aparente está relacionada con el porcentaje de espacio poroso, a valores entre 1.6 y 1.8 g/cm³ corresponde un porcentaje de EP menor al 40 %, valores entre 1.4 y 1.6 g/cm³ corresponde a un porcentaje de EP del 40 al 44 %, valores entre 1.2 y 1.4 g/cm³ corresponde a un porcentaje de 45 a 54 %, 1.0 y 1.2 g/cm³ valores entre corresponde un porcentaje de EP 55 a 62 %. El porcentaje de EP paso de 68.61 % con un criterio clasificado como "muy alto" al inicio a "alta" con valores que oscilan entre 50.85 a 54.92 %, al final del experimento en todos los tratamientos. Los valores relacionados entre la DA y el porcentaje de EP obtenidos para la muestra inicial, testigos y tratamientos corresponden a los citados por Ríos, 1987. La disminución del porcentaje de EP se debe a una disminución en la DR y un ligero aumento en la DA, influida de alguna manera por la forma de riego y no solo por la adición de

sodio intercambiable, que influye en la degradación de la estructura del suelo causada por una elevada concentración de sodio en el complejo de cambio, debido a su efecto dispersor de los sistemas coloidales y la consiguiente destrucción de la estructura. Sin embargo, al encontrar porcentajes bajos de EP en los testigos regados con agua desionizada, se establece que no es el efecto del sodio intercambiable el que influye en la disminución del porcentaje del EP. El riego pudo haber influido en la disminución debido a que a mayor contenido de humedad en el suelo existen importantes modificaciones en su capacidad para resistir y deformarse hasta llegar a compactarse con menores presiones recibidas (Barrera, 2002). La reducción de la porosidad del suelo repercute en propiedades físicas desfavorables debido a una menor aireación del suelo, menor capacidad de infiltración de agua y dificultad para la penetración de las raíces. Generalmente, los suelos bajo sistemas de cultivos y potencialidad de producción presentan problemas de compactación (Flores y Alcalá, 2010). En los tratamientos de siembra directa donde el porcentaje de EP disminuyó hasta el 50%, la biomasa es mayor en comparación a los suelos donde se utilizó la siembra indirecta y se obtuvo un 54% de EP, esto indica que *A. hypochondriacus* no presentó resistencia al desarrollo radicular. Esto puede deberse a que tiene un sistema radicular muy eficiente debido a que cuenta con una raíz pivotante con abundante ramificación y múltiples raicillas delgadas (National Research Council (U.S.), 1984).

Al determinar la textura del suelo usado en el experimento, esta fue la misma al inicio y al final, permaneciendo constante en los testigos y en todos los tratamientos, así, la clase textural correspondiente es la "franco arenoso".

De acuerdo a Flores y Alcalá, 2010, las características del suelo en función de esta clase textural son las siguientes: Conductividad hidráulica = 2.5 cm/hr, Porcentaje de espacio poroso entre el 40 y 47 %, Densidad aparente = 1.5 g/cm³, Porcentaje de capacidad de campo = 14 % en peso, Punto de marchitez permanente = 6 % en peso y Capacidad de retención de agua disponible = 12 % en volumen. De las características anteriores la conductividad hidráulica, el porcentaje de capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y la capacidad de retención de agua disponible no fueron determinados en el presente estudio. Sin embargo, los valores reportados por Flores y Alcalá, 2010, difieren de los aquí obtenidos para el porcentaje de espacio poroso y la densidad aparente. Para el porcentaje de espacio poroso el valor del suelo inicial corresponde al 68 % y disminuye al 50 y 52 % para los testigos de siembra directa e indirecta, respectivamente, correspondiéndose con el tipo de siembra, ya que la siembra directa presentó un porcentaje del 50 % de espacio poroso para ambas conductividades y la siembra indirecta del

54% para ambas conductividades, encontrando que el tipo de siembra también influye en el porcentaje de espacio poroso en el suelo. Frente a la baja cantidad de materia orgánica la porosidad se pudo haber visto ligeramente afectada, ya que la presencia de residuos orgánicos posee un efecto frente a la compactación debido a que dentro de la materia orgánica, la fracción ligada adquiere una mayor importancia debido a que aumenta la porosidad textural, modificando el comportamiento global de los suelos frente a la compactación (Ferrerías *et al.*, 2001).

La materia orgánica se mantuvo en el criterio de “muy bajo” desde el inicio hasta el final del experimento en todos los tratamientos. En los suelos pobres en materia orgánica que tienen concentraciones apreciables de sodio intercambiable, existe menor cantidad de agregados y tienden a la inestabilidad estructural (Black, 1975). En el presente trabajo no se realizó una adición de materia orgánica para evitar interferencias, por lo que se esperaba que esta propiedad disminuyera al final por causa de esto. La adición de materia orgánica contrarresta los efectos nocivos del sodio intercambiable (Allison, *et al.*, 1977).

La conductividad eléctrica de la muestra inicial corresponde $0.66 \text{ dS }^{-1\text{m}}$ con “efectos despreciables de salinidad”, para los testigos la C. E. es de 0.45 y de $0.43 \text{ dS }^{-1\text{m}}$, respectivamente, para los tratamientos de siembra directa de 1 y $4 \text{ dS }^{-1\text{m}}$ los valores de C. E. corresponden a 0.57 y $0.82 \text{ dS }^{-1\text{m}}$, respectivamente, para los tratamientos de siembra indirecta de 1 y $4 \text{ dS }^{-1\text{m}}$ los valores de C. E. corresponden a 0.58 y $0.79 \text{ dS }^{-1\text{m}}$ respectivamente, sin embargo todos los valores corresponden a el mismo criterios, “efectos despreciables de salinidad”. El aumento de la conductividad eléctrica es debido a la concentración de los tratamientos que fueron usados como agua de riego, que contenía bicarbonato de sodio como fuente de salinidad, razón por la cual estos suelos necesitan un manejo cuidadoso para evitar concreciones o costras (Gasca *et al.*, 2011).

En el suelo inicial se presentó un pH de 8.01 “moderadamente alcalino”, el cual permaneció así hasta el final en los testigos de siembra directa con un pH de 8.7 e indirecta con un pH de 8.7 y en los tratamientos de siembra directa e indirecta de $1 \text{ dS }^{-1\text{m}}$ con un pH de 8.44 y de 8.39 , respectivamente; en los tratamientos de siembra directa e indirecta de $4 \text{ dS }^{-1\text{m}}$ el valor inicial aumento a 8.73 y 8.98 considerándolo como “fuertemente alcalino”. Este incremento se vio influido por el lavado de sales solubles debido al riego, el pH incrementa al hidrolizarse el complejo sódico y al aumentar la concentración de OH^- (Navarro y Navarro, 2003). El pH está relacionado con los cationes intercambiables (Allison, *et al.*, 1977), en un pH de 8.0 a 8.5 el suelo

está completamente saturado con bases, existe CaCO_3 libre y el complejo de cambio en su mayor parte por Ca^{++} y Mg^{++} , en los resultados obtenidos el Ca^{++} se encuentra en un nivel "medio" en testigos y "alto" en todos los tratamientos y el Mg^{++} en un nivel "medio", sin embargo el sodio es predominante en el complejo. A un pH de 8.5 a 10 los suelos contienen grandes cantidades de sales solubles y la conductividad eléctrica es "alta", con apreciables cantidades de sodio intercambiables, mayor al 15 %, pero sin formar todavía un horizonte nátrico. Los resultados indican que el ion predominante es el sodio en el suelo inicial, en los testigos y en los tratamientos. Los pH's fuertemente alcalinos, se reportaron en la condición de siembra directa e indirecta a $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ y en estos mismos tratamientos la biomasa y la supervivencia disminuyen, lo que indica que un pH fuertemente alcalino afecta el crecimiento y establecimiento de *A. hypochondriacus*, debido a las condiciones generadas a estos niveles, como es el estrés osmótico provocado por las sales solubles a conductividades eléctrica altas y apreciables cantidades de sodio intercambiables, mayores al 15 % (Ríos, 1987).

Los suelos tienen un C. I. C. que varía de menor que 1 a mayor de 100 Cmol Kg^{-1} (Ríos, 1987). Los resultados obtenidos para el suelo inicial es de $35.38 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, que corresponde a un criterio "alto" y se mantiene hasta al final en los testigos de siembra directa con un valor de $36.49 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ y de siembra indirecta con $38.65 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, en los tratamientos de siembra indirecta de $1 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ el valor es de $37.73 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, en los tratamientos de siembra directa el valor es de $38.66 \text{ Cmol Kg}^{-1}$; y cambia a "muy alto" en los tratamientos, en el de siembra directa de $1 \text{ ds}^{-1\text{m}}$ el valor es de $40.68 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ y en la siembra indirecta de $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ el valor es de $42.09 \text{ Cmol Kg}^{-1}$. Todos los valores entran dentro del intervalo mencionado anteriormente, lo que corresponde a suelos minerales con bajo nivel de materia orgánica (Ríos, 1987), que a su vez corresponden a los resultados obtenidos en el presente trabajo. A pH ácidos la C. I. C. T. disminuye, debido a que los sitios activos de la materia orgánica quedan estabilizados y son ocupados por los iones de Al^{3+} , AlOH^{2+} y AlOH_2^+ , y solo hasta que el pH aumenta y se forma el AlOH_3 , precipitan y dejan vacíos los sitios de intercambio que ocuparan las bases intercambiables (Ríos, 1987).

Los resultados obtenidos en la determinación de bases intercambiables indican que en la muestra inicial el K^+ tiene $2.74 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ equivalente al 8%, aumenta a $6.94 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ con un 19% para el testigo de siembra directa y a $5.26 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ con un 17% para el testigo de la siembra indirecta; para los tratamientos de siembra directa con concentración de 1 y $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ fue de 5.28 y $5.74 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, con 14 y 15% respectivamente; para los tratamientos de siembra indirecta con concentración de 1 y $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ fue de 6.61 y $5.68 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, con 15 y 13%

respectivamente, en todos los casos los valores corresponden a un criterio "alto". Las altas concentraciones de potasio pueden causar problemas en cultivos sensibles (INIFAP, 2001). Para el caso del Na^+ , que fue la base en mayor proporción, la muestra inicial reportó un valor de 23.96 Cmol Kg^{-1} equivalente al 68% y disminuye en los testigos de siembra directa a 20.64 Cmol Kg^{-1} con un 57%, en la siembra indirecta a 18.1 Cmol Kg^{-1} con un 57%, para los tratamientos de siembra directa con conductividad de 1 y 4 $\text{dS}^{-1\text{m}}$ fue de 19.67 y 19.2 Cmol Kg^{-1} , con 48 y 50% respectivamente; y para los tratamientos de siembra indirecta con conductividad de 1 y 4 $\text{dS}^{-1\text{m}}$ fue de 22.71 y 21.24 Cmol Kg^{-1} , con 51 y 50% respectivamente; en todos los casos los valores corresponden a un criterio "muy alto". Los iones de sodio altamente hidratados, afectan la estructura del suelo debido a que no pueden neutralizar la carga de las arcillas, cuando es absorbido en grandes cantidades por el coloide bajo estas condiciones tiene una carga negativa por la distancia existente entre catión y la arcilla de manera que las arcillas se rechazan y producen la dispersión del suelo (Ríos, 1987). Para el caso del Ca^{++} la muestra inicial reportó un valor de 6.18 Cmol Kg^{-1} equivalente al 17%, para los testigos de siembra directa la concentración es de 7.1 Cmol Kg^{-1} equivalente al 19% y de 5.65 Cmol Kg^{-1} para la siembra indirecta equivalente al 18%, para los tratamientos de siembra directa con conductividad de 1 y 4 $\text{dS}^{-1\text{m}}$ fue de 13.16 y 11.2 Cmol Kg^{-1} , equivalente al 32% y 29% respectivamente; y para los tratamientos de siembra indirecta con conductividad de 1 y 4 $\text{dS}^{-1\text{m}}$ fue de 12.55 y de 12.74 Cmol Kg^{-1} , equivalente al 28 y 30%. En los casos la muestra inicial y los testigos los valores corresponden a un criterio "medio" y para los todos los tratamientos "alto". Las altas concentraciones de calcio pueden causar problemas en cultivos sensibles (INIFAP, 2001). Para el caso del Mg^{++} la muestra inicial reportó un valor de 2.5 Cmol Kg^{-1} equivalente al 7%, para los testigos de siembra directa e indirecta la concentración es de 1.81 y de 2.74 Cmol Kg^{-1} , equivalente al 5 y 9% respectivamente, para los tratamientos de siembra directa con conductividad de 1 y 4 $\text{dS}^{-1\text{m}}$ fue de 2.57 y 2.53 Cmol Kg^{-1} , equivalente al 6 y 7% respectivamente; y para los tratamientos de siembra indirecta con conductividad de 1 y 4 $\text{dS}^{-1\text{m}}$ fue de 2.76 y de 2.43 Cmol Kg^{-1} , ambas equivalente al 6%. En todos los casos los valores corresponden a un criterio "medio". Las altas concentraciones de magnesio pueden causar problemas en cultivos sensibles (INIFAP, 2001).

Black, 1975 reporta que la proporción de las bases intercambiables en suelos sódicos corresponde al 33% para el Magnesio, 33% para el calcio, 29% para el sodio y del 2% para el potasio. En los resultados obtenidos para la determinación de las bases intercambiables el suelo inicial presenta un 67% de sodio y disminuye en los tratamientos con mayor conductividad hasta el 50%. El suelo inicial, los testigos y los tratamiento de siembra directa e indirecta de 1 $\text{dS}^{-1\text{m}}$ y

4 dS ^{-1m} donde se presenta un valor no es menor al 50% de sodio el orden de la proporción de bases es Na>Ca>K>Mg. Allison y colaboradores, 1977, establecen que el calcio y el magnesio son los principales cationes intercambiables de los suelos normales de las regiones áridas y el potasio tiene menor presencia debido a su menor absorción, sin embargo puede llegar a tener proporciones mayores. En ciertos casos se ha observado que los suelos sódicos con alto contenido de potasio intercambiable tienen mejores propiedades físicas y son más fáciles de recuperar que otros suelos que contiene cantidades similares de sodio, pero bajas cantidades de potasio intercambiable (Allison, 1977).

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las determinaciones de los análisis químicos para el extracto de saturación.

Cuando se investiga la salinidad del suelo con relación al desarrollo de las plantas, se recomienda usar la conductividad eléctrica del extracto de saturación como un medio para evaluar la salinidad (Allison, 1977). La conductividad eléctrica de la muestra inicial corresponde a 2.34 dS ^{-1m} y el criterio a "muy ligeramente salinos", permaneció igual en los testigos de siembra directa e indirecta con una C. E. de 1.12 y de 1.10 dS ^{-1m}, respectivamente, y en los tratamientos de siembra directa e indirecta de 1 dS ^{-1m} los valores de C. E. corresponden a 1.21 y 1.77 dS ^{-1m}, respectivamente; para los tratamientos de siembra directa e indirecta de 4 dS ^{-1m} los valores de C. E. corresponden a 2.70 y 2.47 dS ^{-1m}, respectivamente y los valores corresponden a un criterio de "moderadamente salino". En los tratamientos de siembra directa e indirecta con riego de conductividad a 4 dS ^{-1m} se presentó una disminución notable del coeficiente biomasa y de porcentaje de supervivencia en comparación con lo de menor conductividad, esta disminución de la biomasa y el porcentaje de supervivencia se debe al aumento la C. E., al aumentar la salinidad las afecciones a nivel fisiológico influyen en el crecimiento o generan la muerte de las plantas debido a los efectos osmóticos, de ion específico y de sodicidad sobre estas (Porta *et al.*, 2009).

A partir del pH obtenido del extracto de saturación se obtienen valores reales de pH a diferencia del pH aplicado a las soluciones de suelo en agua donde se obtienen valores aparentes de pH, que dependen de las características del suelo, la concentración del bióxido de carbono disuelto y a la cantidad de humedad a la que se efectúa la lectura (Allison, 1977). En el suelo inicial se presentó un pH de 7.88 el cual se considera "moderadamente alcalino", el cual permaneció así hasta el final en los testigos de siembra directa con un pH de 8.47 e indirecta con un pH de 8.2 y

cambio en todos los tratamientos a “fuertemente alcalino”, para la siembra directa de 1 y 4 dS ^{-1m} el pH fue de 8.72 y de 8.75, respectivamente; y para los tratamientos de siembra indirecta de 1 y 4 dS ^{-1m} el pH fue de 8.62 y 8.85, respectivamente. Este incremento se ve influido por el lavado de sales solubles debido al riego, el pH incrementa al hidrolizarse el complejo sódico y al aumentar la concentración de OH⁻ (Navarro y Navarro, 2003). A un pH de 8.5 a 10 los suelos tienen un porcentaje de sodio intercambiables mayor al 15 % y la conductividad eléctrica es “alta”, pero sin formar todavía un horizonte nátrico (Allison, 1977), lo cual se corresponde con la C. E. tomada del extracto de saturación.

Los resultados obtenidos en la determinación de cationes solubles indican que en la muestra inicial el K⁺ tiene 9.84 mmol L⁻¹ equivalente al 17%, disminuye a 2.43 mmol L⁻¹ con 9% para el testigo de siembra directa y a 1.85 mmol L⁻¹ con 6% para el testigo de la siembra indirecta; para los tratamientos de siembra directa con concentración de 1 y 4 dS ^{-1m} fue de 2.78 y 4.22 mmol L⁻¹, con 6 y 9 % respectivamente; para los tratamientos de siembra indirecta con concentración de 1 y 4 dS ^{-1m} fue de 2.46 y 2.23 mmol L⁻¹, con 6.7 y 5.7 respectivamente, en todos los casos los valores corresponden a un criterio “alto”. El potasio soluble es un constituyente que se encuentra en pocas proporciones y es de baja importancia aun si su proporción se eleva (Allison, 1977).

Para el caso del Na⁺ la muestra inicial reportó un valor de 20.8 mmol L⁻¹ equivalente al 36% y disminuye en los testigos de siembra directa a 15.44 mmol L⁻¹ equivalente a 57% y de siembra indirecta a 17.1 mmol L⁻¹ equivalente a 59%, para los tratamientos de siembra directa con conductividad de 1 y 4 dS ^{-1m} fue de 26.86 y 33.77 mmol L⁻¹, con 61 y 68% respectivamente; y para los tratamientos de siembra indirecta con conductividad de 1 y 4 dS ^{-1m} fue de 25.52 y 28.77 mmol L⁻¹, con 69 y 73% respectivamente, en todos los casos los valores corresponden a un criterio “muy alto”. El sodio rara vez representa más de la mitad de los cationes solubles y por lo tanto no es absorbido en forma importante, para que sea absorbido debe de representar más de la mitad de los cationes solubles (Allison *et al.*, 1977).

Para el caso del Ca²⁺ la muestra inicial reportó un valor de 11.96 mmol Kg⁻¹ equivalente al 21% y un criterio “bajo” que permaneció hasta el final en los testigos de siembra directa la concentración es de 4.31 mmol L⁻¹ con 16% y de 4.35 mmol L⁻¹ con 15% para la siembra indirecta, al igual que en los tratamientos de siembra indirecta con conductividad de 1 y 4 dS ^{-1m} fue de 4.63 y 4.14 mmol L⁻¹, con 13 y 10% respectivamente; y para los tratamientos de siembra directa con conductividad de 1 y 4 dS ^{-1m} fue de 5.56 y de 6.34 mmol L⁻¹ ambos equivalentes al

13%, que corresponden a un criterio "medio". Disminuyó más el contenido de calcio al final en los tratamientos con conductividades $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$, este ion es uno de los principales iones presentes en la solución de suelos áridos y se ve disminuida su concentración debido a la proporción de sodio.

Para Mg^{2+} la muestra inicial reportó un valor de $14.93 \text{ mmol L}^{-1}$ equivalente al 26%, para los testigos de siembra directa la concentración es de 4.99 mmol L^{-1} con 18% y de 5.73 mmol L^{-1} con 20% para la siembra indirecta, para los tratamientos de siembra directa con conductividad de 1 y $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ fue de 9.12 y 5.66 mmol L^{-1} , con 20 y 11% respectivamente; y para los tratamientos de siembra indirecta con conductividad de 1 y $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ fue de 4.13 mmol L^{-1} con 11% y de 4.03 mmol L^{-1} con 10%, aunque los valores hayan disminuido al final del experimento, en todos los casos los valores corresponden a un criterio "alto". Disminuyó más el contenido de magnesio al final en los tratamientos con conductividades $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$, este ion es uno de los principales iones presentes en la solución de suelos áridos y se ve disminuida su concentración debido a la proporción de sodio.

En los resultados obtenidos para la determinación de cationes solubles el suelo inicial presenta un 36% de sodio y en los tratamientos con conductividad de $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ y pH de 8.5 aumenta hasta el 73%. El suelo inicial, los testigos y el tratamiento de siembra directa de $1 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ donde se presenta un valor menor al 60% de sodio el orden de la proporción de bases es $\text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{K}$; en los tratamientos con más de 60% de sodio, como la siembra directa de $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$, y en los de siembra indirecta de 1 y $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ el orden de la proporción de bases es $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$. El calcio y el magnesio en solución del suelo son más fuertemente absorbidos que el sodio y sus concentraciones pueden ser varias veces mayores, sin embargo, al aumentar el pH y en presencia de carbonatos el calcio y el magnesio precipitan de tal forma que el sodio se vuelve predominante (Allison, 1977), como sucede en los tratamientos donde el sodio es más predominante, el calcio y el magnesio disminuyen y el potasio se encuentra en proporciones bajas.

Los resultados obtenidos en la determinación de aniones solubles indican que en la muestra inicial los carbonatos (CO_3) tienen una concentración de 6 mmol Kg^{-1} , para el testigo de siembra directa es de 7 y de 8 mmol Kg^{-1} para el testigo de siembra indirecta, en los tratamientos de siembra directa e indirecta de $1 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ aumentó a 16 y 24 mmol Kg^{-1} , respectivamente; para los tratamiento de siembra directa e indirecta de $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ fue de 20 y 27 mmol Kg^{-1} . Se presentó mayor concentración de carbonato en los tratamientos con conductividades de $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$,

lo que concuerda con Allison, 1977 quien determinó que al aproximarse el pH a 9.5 pueden presentarse carbonatos, debido a que una parte del sodio intercambiable se hidroliza para formar hidróxido de sodio, que a su vez puede cambiar a carbonato de sodio (Allison, 1977).

Para los bicarbonatos (HCO_3^-) la concentración es de 0 mmol Kg^{-1} para la muestra inicial, los testigos y todos los tratamientos, aunque puede presentarse en pequeñas cantidades, estos se forman con la solución del CO_2 en agua (Allison, 1977).

Para los cloruros (Cl^-) la muestra inicial tiene una concentración de 6.33 mmol Kg^{-1} , disminuyó el testigo de siembra directa a 2.67 y a 4 mmol Kg^{-1} para el testigo de siembra indirecta; para los tratamientos de siembra directa de 1 y 4 dS^{-1}m la concentración es de 3.33 y 7.67 mmol Kg^{-1} , respectivamente; para los tratamientos de siembra indirecta de 1 y 4 dS^{-1}m las concentraciones corresponden a 5.33 y 6.5 mmol Kg^{-1} , respectivamente. Las concentraciones al inicio y al final son similares en los tratamientos con mayor conductividad y menores en los testigos y en los tratamientos con conductividad de 1 dS^{-1}m . Estos forman parte de los principales iones (Allison, 1977).

Para los sulfatos (SO_4^{2-}) el suelo inicial tiene una concentración de 0.84 me L^{-1} , aumenta a 1.16 y 1.38 me L^{-1} en los testigos de siembra directa e indirecta, respectivamente; para los tratamientos de siembra directa de 1 y 4 dS^{-1}m las concentraciones aumentaron a 5.21 y 5.72 me L^{-1} respectivamente; para los tratamientos de siembra indirecta de 1 y 4 dS^{-1}m la concentración aumentó a 5.86 y 5.88 me L^{-1} , respectivamente. Los sulfatos aumentan en ambos tratamientos y su presencia se puede deber a que en suelos no yesíferos el sulfato pueden encontrarse en concentraciones 30 me L^{-1} , siendo que los suelos con yeso no superan los 8.2 a pesar del valor del PSI, lo que se corresponde con los datos obtenidos. A medida que la solución del suelo se concentra más por causa de la evaporación del agua y su adsorción por las plantas, los límites de solubilidad de los sulfatos se excede por lo cual precipitan causando el correspondiente aumento en las proporciones relativas de sodio (Allison, 1977).

El porcentaje de saturación de bases (PSB) fue del 100 % para el suelo inicial, los testigos y todos los tratamientos, reportando un criterio de "saturado" para todos. El sodio es el ion predominante. De acuerdo a Ríos, 1987, en un pH de 8.0 a 8.5 el suelo está completamente saturado con bases, estos valores corresponden a los obtenidos en la determinación del pH, que se concuerdan con el porcentaje de saturación de bases.

La relación de absorción de sodio (RAS) fue de 5.67 en el suelo inicial y aumentó a 7.16 y 7.62 en los testigos de siembra directa e indirecta, respectivamente; en los tratamientos de siembra directa e indirecta de 1 dS^{-1m} aumento a 9.91 y 12.19, respectivamente; en los tratamientos de siembra directa e indirecta de 4 dS^{-1m} aumento a 13.79 y 14.23, respectivamente. El RAS aumenta considerablemente al final del experimento en los tratamientos con conductividades mayores y concuerda con un PSI alto, el aumento en el RAS se debe a que en estos tratamientos el sodio en solución rebasa el 50%, el calcio y el magnesio precipitan y el sodio intercambiable ocupa estos espacios y aumenta (Allison, 1977).

Los resultados del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) indicaron que el suelo inicial tuvo un valor de 58.79 % y disminuyó en los testigos de siembra directa e indirecta a 42.31 % y 44.24 %, respectivamente; en los tratamientos de siembra directa e indirecta de 1 dS^{-1m} aumentó a 66.03 % y 67.64 %, respectivamente; en los tratamientos de siembra directa e indirecta de 4 dS^{-1m} aumentó a 68.35 % y 87.35 %, respectivamente. El suelo inicial, los testigos y los tratamientos presentaron un PSI mayor 15%, aunque se presentaran diferencias en el suelo inicial y los testigos con un pH entre 7.88 y 8.47 y en los tratamientos un pH entre 8.62 y 8.85, esto puede deberse a que el pH está relacionado con el PSI de tal forma que a un pH menor a 8.5 el PSI puede o no ser mayor de 15% y en un pH mayor a 8.5 el PSI es mayor al 15%; el PSI alto en los tratamientos con conductividad de 4 dS^{-1m} se corresponde con el RAS alto en los mismos tratamientos, debido a que a medida que aumenta el RAS el PSI también aumenta (Allison, 1977).

Tratamiento	C. E. del extracto de saturación (dS ^{-1m})	pH del extracto de saturación (H ₃ O ⁺)	PSI	Clasificación del suelo
MI	2.34	7.88	67.72	Sódico no salino
TG	1.2	8.47	53.40	Sódico no salino
TP	1.10	8.2	49.60	Sódico no salino
TSC1	1.21	8.72	48.35	Sódico no salino
TSC2	2.71	8.75	49.69	Sódico no salino
TPC1	1.77	8.62	60.19	Sódico no salino
TPC2	2.47	8.85	49.51	Sódico no salino

Cuadro 12. Valores de C. E., pH y PSI para clasificar el tipo de suelo en base a las salinidad. La nomenclatura usada corresponde de la siguiente manera: MI = suelo inicial (control), TG = Suelo del testigo de siembra directa TP = Suelo del testigo de siembra indirecta, TSC1= Suelo de la siembra directa con conductividad de 1 dS ^{-1}m , TSC2 = Suelo de la siembra directa con conductividad de 4 dS ^{-1}m , TPC1 = Suelo de la siembra indirecta con conductividad de 1 dS ^{-1}m , TPC2 = Suelo de la siembra indirecta con conductividad de 4 dS ^{-1}m .

De acuerdo a la clasificación de suelos en base a la salinidad los suelos sódicos no salinos son aquellos donde se presenta una conductividad eléctrica no mayor a 4 dS ^{-1}m , pH cercano a 8.5 hasta 10, pero puede reducirse si se encuentran carbonatos, y un PSI mayor al 15%. Estos rangos corresponden con los encontrados en el presente trabajo y se clasifican con respecto a la salinidad como suelos "sódicos no salinos" como se ve en la tabla 12. Para mejorar estos suelos se requiere reemplazar el sodio intercambiable (Allison, 1977). En el presente estudio se propuso una fitorremediación, que es un método, que utiliza plantas para descontaminar suelos, lodos y agua, lo que representa ventajas económicas y ecológicas (Núñez *et al.*, 2007), a través de plantas adaptadas a medios salinos puedes servir para mejorar los suelos, el uso de plantas de este tipo puede resultar efectivo para hacer disminuir la salinidad o sodicidad (Villafañe *et al.*, 2004) como es el caso de *Amaranthus hypochondriacus*, que es una planta traslocadora de sodio, debido a que tiene un metabolismo C4, donde el sodio es un elemento esencial y forma parte del metabolismo, además es tolerante a la salinidad y a la alcalinidad (National Research Council (U.S.), 1984), por lo que resiste los efectos causados al suelo por las sales solubles y el sodio intercambiable, responsable de la alcalinidad.

Conclusiones

- El porcentaje de germinación de las semillas de *Amaranthus hypochondriacus* es una variable que disminuye hasta anularse a medida que aumenta la concentración de sales disueltas de NaHCO_3 .
- La altura de *Amaranthus hypochondriacus* se ve directamente influida por la condición de siembra e inversamente a la concentración, en condición de siembra directa y a menor conductividad los valores son mayores.
- El diámetro del tallo de *Amaranthus hypochondriacus* es inversamente proporcional a la concentración.
- El porcentaje de supervivencia de *Amaranthus hypochondriacus* se ve directamente influido por la concentración de NaHCO_3 , a menor concentración el porcentaje aumenta.
- El índice de biomasa de *Amaranthus hypochondriacus* se ve directamente afectada por la condición de siembra y la concentración, obteniendo promedios más altos en las siembras directas y en conductividades bajas.
- El trasplante generó un efecto sobre la disminución del crecimiento de la planta inducido por el estrés fisiológico que produce el déficit de agua y reducción de crecimiento al afectar la fotosíntesis.
- *Amaranthus hypochondriacus* presenta características de planta acumuladora, por presentar un factor de traslocación y un factor de bioacumulación muy cercano a 1, por lo tanto a mayor concentración de sales en el suelo, estas son traslocadas a la parte aérea en mayor cantidad.
- En los análisis físicos para suelo la densidad real y aparente cambiaron del inicio al final, modificando el porcentaje de espacio poroso sin que las plantas se vieran afectadas por esta propiedad. La materia orgánica y la textura no cambiaron al final del experimento y no se mostraron efectos considerables que influyeran en el desarrollo de la planta con relación a estas propiedades.
- Los análisis químicos de conformidad para la fertilidad demostraron que el pH y la conductividad no influyeron directamente sobre los efectos del desarrollo de la planta, sin embargo si tuvieron influencia en otras propiedades que afectaron el desarrollo como es el caso de las bases intercambiables y los cationes solubles presentes. El pH y la conductividad eléctrica para los análisis de conformidad para la salinidad demostraron tener un efecto directo sobre el desarrollo y establecimiento de la planta debido a que a

medida que aumenta la CE por presencia del sodio intercambiable el pH aumenta y la altura, el diámetro, la biomasa y la supervivencia disminuyen.

- El sodio intercambiable disminuyó de concentración del inicio al final del experimento en todos los tratamientos, pero la adición de este ion en el agua de riego aumentó su proporción dentro de las bases intercambiables. Sin embargo aún habiendo incrementado la proporción de sodio intercambiable este no aumento de concentración al final, debido a que la planta traslocó el excedente a la parte aérea.
- De acuerdo a la clasificación de suelos en función a la salinidad el pH, CE, PSI y presencia de carbonatos, los suelos donde se desarrolló el cultivo corresponden a "Suelo sódicos no salino".
- Debido a que a $4 \text{ dS}^{-1\text{m}}$ los cultivos sensibles presentan afecciones fisiológicas debido al efecto ejercido por el sodio intercambiable en el suelo, se establece que *A. hypochondriacus* al ser una planta C4 que trasloca de forma esencial el sodio, resistente a la salinidad y a los efectos influidos por el sodio intercambiables, aunque afecte su desarrollo sin presentar un porcentaje de supervivencia menor al 65% y características de planta acumuladora, al haber obtenido un factor de traslocación y bioacumulación cercano a 1, se establece que es una planta candidata a ser utilizada como herramienta de fitoextracción en suelos en proceso de sodificación o problemas por sodio intercambiable.

Bibliografía

1. Allison, L. E.; Brown, J. W.; Hayward, H. E., Richards, L. A.; Berstein, L.; Fireman, M.; Pearson, G. A. ; Wilcox, L. V.; Bower, C. A.; Hatcher, J. T.; Reeve, R. C. 1977. **Suelos salinos y sódicos. Diagnóstico y rehabilitación.** 6 ed. Editorial Limusa. Pp: 1-89.
2. Barrera, B. M. 2002. **Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables.** Tesis de Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. p 1-7.
3. Benton J. J., 1998. **Plant nutrition: Manual.** Editorial CRC Press. Washington, D.C. P149.
4. Borroto, P. M.; Saiz M. J.; Sánchez R. A.; La Guardia, M. T. 2003. **Amaranth alternative crop for desertification process areas, some cuban experience.** Revista Electrónica de la Agencia de Medio ambiente, 3(5): 1-5.
5. Bronwyn, J. B.; Vera, E. R.; Balderas, E; Pantoja, O. 2007. **Mecanismos de tolerancia a la salinidad en plantas.** *Biotechnología*, 14(3):263-272.
6. Brownell, P.F., 1965. **Sodium as an essential micronutrient element for a higher plant. (*Atriplex vesicaria*).** *Plant Physiology*. 40, 460-468.
7. Brownell, P.F., 1967. **Sodium as an essential micronutrient element for higher plants.** *Plant Soil*, 28,161-164.
8. Brownell, P.F. y Bielig, L.M. 1996. **The role of sodium in the conversion of pyruvate to phosphoenolpyruvate in mesophyll chloroplasts of C4 plants.** *Australian Journal of plant Physiology*. 23, 171-177.
9. Brownell, P.F.; Bielig, L.M. y Grof, C.P.L., 1991. **Increased carbonic anhydrase activity in leaves of sodium –deficient C4 plants.** *Australian Journal of plant Physiology*. 18, 589-592.
10. Brownell, P.F. y Crossland, C.J.1972. **The requirement for a sodium as a micromutrimint by species having the C4 dicarboxylic photosynthetic pathway.** *Plant Physiology*, 49, 794.797
11. Camejo, D. y Torres, W. 2000. **La salinidad y sus efectos en los estadios iniciales del desarrollo de dos cultivares de tomate (*Lycopersiconesculentus*, Mill).** *Cultivos Tropicales*. 21(2), 23-26.
12. Carpena, R.O. y Bernal, P.M. 2007. **Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos.** *Ecosistemas*. 16(2): 1-3.

13. Cisneros, J. 2001. **La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada**. Editorial Limusa. Colegio de ingeniería ambiental de México, A.C. Instituto de ingeniería de la UNAM y FEMISCA.
14. Días, R. R.; Hunter Arvel. 1982. **Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación de invernadero**. CATIE, Centro Agronómico Tropical de investigación y enseñanza. Turrialba, Costa Rica. Pp. 60.
15. **Domínguez, A. N.N. 2009. Fitorremediación de compuestos fenólicos en aguas residuales, con peroxidasas vegetales. Tesis de licenciatura FES Zaragoza, UNAM, México D.F. p 5.**
16. Eugene A, 2002. **Ecología de las aguas corrientes**. Editorial Acribia S.A. Zaragoza, España.
17. Ferreras, L. A.; De Battista, J. J.; Ausilio, A. y Pecorari, C. **Physical parameters of a soil under minimum tillage and non-disturbed conditions**. *Pesq. agropec. bras.* [online]. 2001, vol.36, n.1, pp. 161-170.
18. Flores, D. L. y Alcalá, M. J. 2008. **Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos**. Departamento de edafología, Instituto de Geología. UNAM. México, D. F. p 6.
19. Gallegos, G.E.; Hernández, A. E.; García, N.E.; Acevedo, S.O. 2011. **Contenido y Traslocación de plomo en avena (*Avena sativa*, L) de un suelo contaminado**. *Revista Chapingo*. Serie ciencias forestales y del ambiente, 17(1):19-29.
20. Garbisu, C.; Alkorta, L. 1997. **Basic concept on heavy metal soil bioremediation**. *Proc. and Env. Prot.* 3(1): 58-66.
21. **Garbisu, C.; Beceml, J.M.; Epelde, L.; Akorta, L. 2007. Bioindicadores de la calidad del suelo: herramientas metodológicas para la evaluación de la eficiencia de un proceso fitorremediador. *Ecosistemas* 16 (2): 44-49.**
22. García, S. J.; Estrada, O. S.; Cristóbal A. D.; Estrada, G. F. 2006. **Calidad química del agua subterránea de la Ciénega de Chapala como factor de degradación del suelo**. *Terra Latinoamérica*, 24(4): 503-513.
23. Gasca, A. C.; Menjivar, C. J.; Torrente T. A. 2011. **Porcentaje de sodio intercambiables (PSI) y la relación de absorción de sodio y su influencia en la actividad y biomasa microbiana**. *Acta Agronómica* 60 (1): 27-38.
24. Ghannoum, O. 2008. **C₄ photosynthesis and water stress**. *Annals of Botany* 103: 635–644.

25. Goykovic, C. V. y Saavedra, Del R. G. 2007. **Some effects of salinity on the tomato cultivars and agronomic practices in its managing.** *IDESIA*, 25(3):47-58.
26. Gutiérrez, M. V. 2002. **Aspectos básicos de la nutrición mineral de las plantas, absorción foliar de sustancias útiles en la aplicación de agroquímicos al follaje.** Fertilización Foliar: Principios y aplicaciones. Pp. 1-6.
27. Hanor, J. S. 1994. **Origin of saline fluids in sedimentary basin.** *Geological Society*, 78: 151-172.
28. Hegarty, T. W. 1987. **The physiology of the seed hydration and dehydration and the relation between stress and the control of germination.** A review. *Plant Cell Environ.* 1: 101-119.
29. Hartmann, H.t. y Kester, D.G. 1994. **Propagación de plantas: principios y prácticas.** 3 ed. Compañía editorial Continental. México, D.F. Pp. 759.
30. Hernández M. A., 1992. **Depuración de aguas residuales.** 2ª ed. Editorial Colegio de Ingenieros de caminos, puentes y puertos. Madrid, España.
31. INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 2001. **Problemas de salinidad de suelos irrigados de las zonas medias y del altiplano de San Luis Potosí.** Comité editorial del Campo Experimental Palma de la Cruz. Folleto Técnico No. 11. San Luis Potosí, México. P 24.
32. Jaramillo, F. D. 2002. **Introducción a la ciencia del suelo.** Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Pp. 26-30.
33. Johnston, M. Grof, C.P.L. y Brownell, P.F., 1984. **Responses to ambient CO₂ concentrations by sodium-deficient C4 plants.** *Australian Journal of plant Physiology.* 11, 137-141.
34. Johnston, M. Grof, C.P.L. y Brownell, P.F., 1988. **The effect of sodium nutrition on the pool sizes of intermediates pf the C4 photosynthetic pathway.** *Australian Journal of plant Physiology.* 15, 749-760.
35. Katagiri, B.B.S.2012. **Estudios sobre la biodisponibilidad de metales en suelo que recubren depósitos de jales.** Tesis de licenciatura de la Facultad de Ingeniería. UNAM. México, D. F. p 36.
36. Landis T. D.; Tinus, R.W.; McDonald, S.E.; Barnett, J.P. 1989. **Mineral nutrients and fertilization.** In: **The container Tree Nursery Manual, Vol 4.Agriculture Handbook 674.** Eds. Forest Service U.S. Dep. of Agric., Pp 1-70.
37. Lauchli, A. y Lutge, U. 2002. **Sodium-Calcium interaction under salinity stress.** *Salinity: Environment - Plants - Molecules*, Pp. 205–227.

38. Laynez, G. J.; Mendez, J. R. Figueroa, J. M. 2007. **Effect of soil salinity on seed germination of different weights in corn in Eastern Venezuela.** *Temas agrarios*, 12 (2): 62-73.
39. Legaria, s. J.; Ponce, R. G.; Muñoz O. A. 2000. **Effect of osmotic stress on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticuma estivum* L.) and amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.).** *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 23, 153-166.
40. Martínez, R. S.; Zalba, P.; Villamil, M. B.; Peineman, N. 2001. **Efectos de cationes sobre propiedades hidrofísicas de suelos con diferentes minerales de arcilla.** *Ciencias del suelo*, 19(2): 85-91.
41. Mesa, D.2003. **Obtención de plantas resistentes a la salinidad para los suelos salinos cubanos.** *Revista Cubana de Ciencias Agrícola*, 37(3): 217-226.
42. Miyamoto, S.; Chacon, A. 2006. **Soil salinity of urban turf areas irrigated with saline water. Soilfactors.** *Landscape and Urban Planning*, 77: 28-38.
43. Mohedano, C. L.; Cetina, A. V. M.; Chacalo, H. A.; Trinidad, S. A.; Gonzáles, C. F. 2005.**Growth and post-transplanting stress of pine trees in urban saline soil.** *Revista Chapingo, serie horticultura* 11 (1): 43.50.
44. Mujica, A. y Quillahuaman, A. 1989. **Fenología del cultivo de la kiwicha (*Amaranthus hypochondriacus* L.).** Curso taller fenología de cultivos andinos y uso de la información agrometeorológica. INIA, PICA: 29-31.
45. Navarro, B.S. y Navarro G. G., 2003. **Química agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal.** 2º ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. Pp 487.
46. **National Research Council (U.S.).Panel on Amaranth, 1984. Amaranth: Modern for an ancient crop. National Academy Press. Washington, D.C. Pp 81.**
47. **Norma Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000.** "Establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad, y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreos y Análisis". México. D.F. pp. 26-81.
48. Núñez, M. G.; Alarcón, H. M.; Melgoza, C. A.; Rodríguez, A. F.; Royo, M. M. 2007. **Evaluación de tres especies nativas del desierto chihuahuense para uso en fitorremediación.** *Terra Latinoamericana*, 25(1):35-41.
49. Ongley, E. D. 1997. **Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO riego y drenaje, 55.** FAO. Burlington, Canadá. Pp. 687.
50. Palomo, R. M.; Rivera, G. M.; Martínez, R. G.; Contreras, f. R.; Espinoza, A. J. 2013.**Uso de aguas salinas y frecuencias de aplicación asociadas a la salinización de suelos y producción de algodónero.** *Agrofaz*, 13(3):119-124.

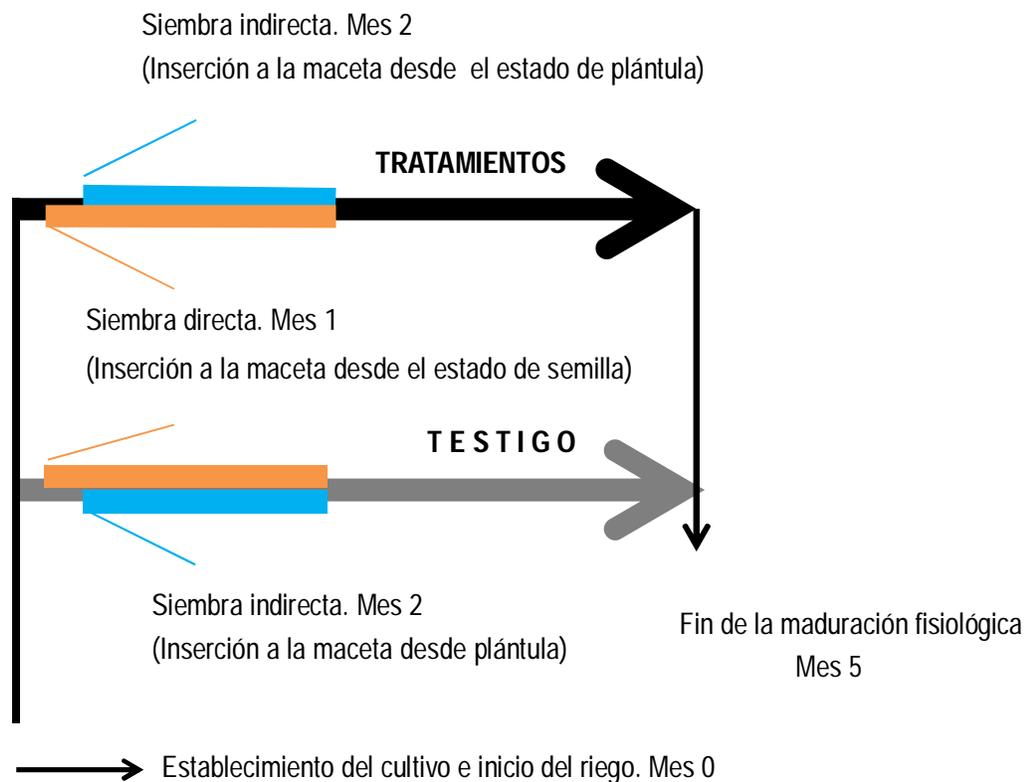
51. Patel, A. D. and Pandey A. N. 2007. **Effect of soil salinity on growth, water status and nutrient accumulation in seedling of *Cassia Montana* (Fabaceae).** Journal of Arid Environments, 70: 174-182.
52. Pérez, B.; Aragón, A.; Pérez, R.; Ricardo, L.; López, J. F. 2011. **Entomofaunistic study in of the cultivation of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) in Puebla, Mexico.** Revista Mexicana de ciencias Agrícolas, 2(3): 359-371.
53. Porta J.; López-Acevedo M.; Roquero C. 2009. **Edafología para la agricultura y el medio ambiente.** 3º ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. Pp 650.
54. Qadir, M.; Ghafoor, A.; Murtaza, G. 2000. **Amelioration strategies for saline soils.** *Land Degrad. and Develop.* 11:501-521.
55. Qadir, M Q.; R. H. Ahmad, N. 2002. **Amelioration of calcareous saline sodic soils thought phytoremediation and chemical strategies.** *Soil Use and Management.* 18(4): 381-385.
56. Ramos, B. R.; Cajuste, J. L.; Flores, R. D.; García, C. N. 2001. **Heavy metals, salts and sodium in chinampa soils in México.** *Agrociencia* 35: 385-395.
57. Reyes P. 1981. **Diseño de experimentos aplicados.** Editorial Trillas. México, D.F. Pp. 344.
58. **Reyes J. I. 1996. Fundamentos teórico-prácticos de temas selectos de la ciencia del suelo. Parte 1. UAM, Iztapalapa. México, D.F. P 80.**
59. Ríos G. R. 1987. **Laboratorio integral de biología IV, practicas del módulo de edafología.** Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
60. **Rojas C.D.; Pismag P.R. Y.; Elizalde, C.A.; Vivas, Q.N.; Erazo, C.C.A. 2010. Efecto de la germinación sobre el contenido y digestibilidad de proteína en semillas de amaranto, quinua, soya y gandul. Rev. Bio. Agro. Vol. 8, no. 1. Pp 35-42.**
61. Rueda O. 2009. **La salinidad:¿Un problema o una opción para la agricultura?** Plaza y Valdés S.A. de C.V. Hermosillo México. Pp. 35.
62. Salisbury, B. F. y Clean W. R. 2000. **Fisiología de las plantas.** 2 ed. Editorial Paraninfo. Madrid, España. Pp. 177.
63. **Shutcliffe, J. F. y Baker, D. A. 1984. Las plantas y las sales minerales.** Editores Omega. Barcelona, España. Pp 60.
64. Sequí, P. 2004. **Los microelementos en la nutrición vegetal.** Instituto Experimental para la Nutrición de la Planta. Editorial Meta. Lanciano, Italia. Pp. 10-12.
65. Sonmez S; Buyuktas D.; Okturen F.; Ciltak S. 2008. **Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies.** *Geoderma*, 144: 361-369.

66. Thompson, L. M. y Troeh, F. R. 1998. **Los suelos y su fertilidad**. 4 ed. Editorial Reverte. Barcelona, España. Pp. 639.
67. Trejo, T. L.; Peralta, S M. Gómez, M.F.; Rodríguez, M. M.; Serrato, C. M. Arévalo, B. A. 2013. **Sodium chloride and dry biomass and macronutrient cations absorption in cempasúchil (*Tagetes erecta* Linn.)**. *Revista Mexicana de Ciencia Agrícolas*, Pub. Esp.(5):979-990.
68. USDA, 1954. **Diagnoses and improvement of saline and alkali soils**. *Agric. Handbook* No. 60. USSS, Riverside, CA, USA.
69. Vargas, C. G.; Rodríguez, R. A. 2000. **Influencia de las aguas de riego en los procesos de salinización y sodificación de los suelos en cultivos de plátano y tomate (I. Canarias)**. *Edafología*, 7(3): 129-136.
70. Villafañe, R.; De León, N.; Camacho, F.; Ramírez, R.; Sánchez, L. 2004. **Acumulación y lavado de sales en columna de suelo regadas con aguas salinas procedentes de un pozo petrolero**. *Agronomía Trop.* 54(1): 93-120.
71. Zinck, A. 2005. **Suelos, información y sociedad**. *Gaceta Ecológica*, 76: 7-22.

Anexo

Salinidad Clase/Riesgo	Conductividad eléctrica (dS ^{-1m})	Descripción
I Baja	0.0010- 0.0025	Conveniente para la mayoría de los cultivos, necesita poca lixiviación.
II Media	0.0025 - 0.0075	Cultivos de tolerancia a la sal moderada o necesita lixiviación moderada.
III Alta	0.0075 – 0.0225	Plantas con buena tolerancia a la sal en suelo drenado con control de salinidad
IV Muy Alta	> 0.0225	No conviene regar excepto en usos ocasionales bajo control de salinidad.

Fig. 1. Clases de salinidad de agua para riego.
(Fuente: USDA, AgricultureHandbook No. 60,1954).



Condiciones de siembra

Siembra Indirecta. Semillas germinadas sobre cajas petri en incubadora a 25 °C.

Siembra Directa. Semillas germinadas sobre bolsas maceteros en condiciones de vivero.

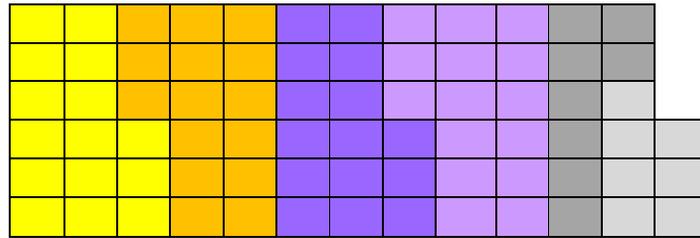
Tratamientos

Sustrato regado con dos soluciones de NaHCO_3 .
 Tratamiento 1: C.E.= 1 dS y Tratamiento 2 : C.E. =4 dS

Testigo

Sustrato regado con agua desionizada.

Fig. 2 Diagrama que muestra el diseño experimental del cultivo desde su establecimiento hasta la madures fisiológica de *Amaranthus hypochondriacus*



Especificaciones de los bloques de la figura 2:



Bloque 1: Siembra indirecta, C.E.= 1 dS⁻¹m.



Bloque 2: Siembra indirecta, C.E.= 4 dS⁻¹m.



Bloque 3: Siembra directa, C.E.= 1 dS⁻¹m.



Bloque 4: Siembra directa, C.E.= 4 dS⁻¹m.



Bloque 5: Testigo (agua desionizada), siembra directa.



Bloque 6: Testigo (agua desionizada), siembra indirecta.

Fig. 3 Figura que muestra la distribución de las macetas
En los bloques del plantío de *Amaranthus hypochondriacus*

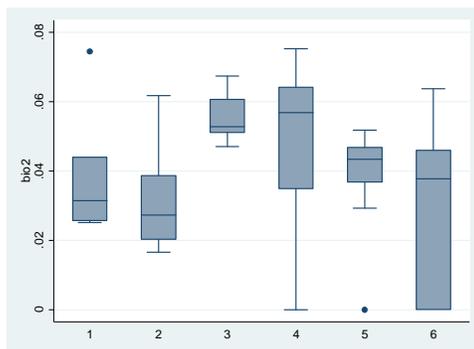
Análisis estadístico

Análisis de varianza de una sola vía y comparación múltiple de Bonferroni para la variable de coeficiente biomasa a través de los siguientes comandos en StataSE 11:

```
. sum bio2
```

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
bio2	75	.0407142	.020303	0	.0752517

```
. graph box bio2, over (trat)
```



```
. robvar bio2, by(trat)
```

Summary of bio2			
Tratamiento	Mean	Std. Dev.	Freq.
1	.03771172	.01736473	7
2	.03136401	.01499883	8
3	.05532657	.00615419	15
4	.04711559	.02638229	15
5	.04011571	.01259172	15
6	.02668689	.02250162	15
Total	.04071421	.02030299	75

W0 = 5.5529894 df(5, 69) Pr> F = 0.00023478

W50 = 2.6644198df(5, 69) **Pr> F = 0.02923748**

W10 = 6.6935170df(5, 69) Pr> F = 0.00003887

. oneway bio2 trat, means bonferroni

```
| Summary of
| bio2
Tratamiento | Mean
-----+-----
1 | .03771172
2 | .03136401
3 | .05532657
4 | .04711559
5 | .04011571
6 | .02668689
-----+-----
Total | .04071421
```

```
Analysis of Variance
Source      SS      df    MS      F    Prob> F
-----
Between groups  .007536851  5  .00150737  4.53  0.0013
Within groups  .022966786 69  .000332852
-----
Total          .030503637 74  .000412211
```

Bartlett's test for equal variances: chi2(5) = 26.9039 Prob>chi2 = 0.000

Comparison of bio2 by Tratamiento
(Bonferroni)

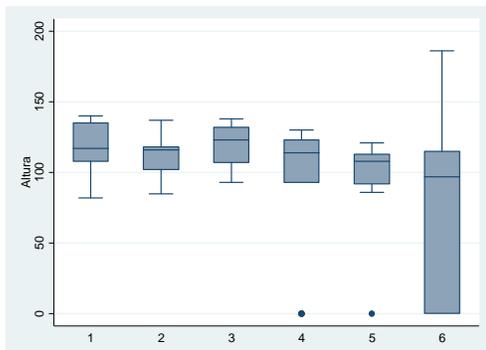
Row Mean-	1	2	3	4	5
2	-0.006348				
	1.000				
3	.017615	.023963			
	0.578	0.056			
4	.009404	.015752	-.008211		
	1.000	0.789	1.000		
5	.002404	.008752	-.015211	-.007	
	1.000	1.000	0.382	1.000	
6	-.011025	-.004677	-.02864	-.020429	-.013429
	1.000	1.000	0.001	0.046	0.716

Análisis de varianza de una sola vía y comparación múltiple de Bonferroni para la variable de altura a través de los siguientes comandos en StataSE 11:

```
. sum alt
```

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
alt	75	99.92667	40.4605	0	186

```
. graph box alt, over (trat)
```



```
. robvar alt, by(trat)
```

Summary of Altura			
Tratamiento	Mean	Std. Dev.	Freq.
-----+-----			
1	116.28571	19.102481	7
2	111.75	16.679757	8
3	118.8	14.610173	15
4	93.066667	49.050217	15
5	97.766667	29.080471	15
6	76.133333	60.291988	15
-----+-----			
Total	99.926667	40.460499	75

W0 = 6.9910629 df(5, 69) Pr> F = 0.0000246

W50 = 2.8127509df(5, 69) **Pr> F = 0.02271983**

W10 = 9.1261028df(5, 69) Pr> F = 0.00000107

```
. oneway alt trat, means bonferroni
```

Summary of	
Altura	
Tratamiento	Mean
-----+-----	
1	116.28571
2	111.75
3	118.8
4	93.066667
5	97.766667
6	76.133333
-----+-----	
Total	99.926667

Analysis of Variance

Source	SS	df	MS	F	Prob> F
Between groups	17602.4181	5	3520.48362	2.35	0.0501
Within groups	103539.429	69	1500.57143		
Total	121141.847	74	1637.05198		

Bartlett's test for equal variances: $\chi^2(5) = 35.2500$ Prob> $\chi^2 = 0.000$

Comparison of Altura by Tratamiento
(Bonferroni)

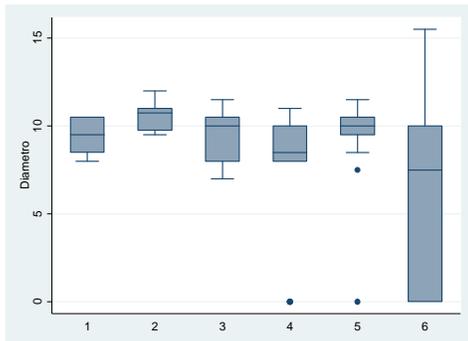
Row Mean-					
Col Mean	1	2	3	4	5
2	-4.53571				
	1.000				
3	2.51429	7.05			
	1.000	1.000			
4	-23.219	-18.6833	-25.7333		
	1.000	1.000	1.000		
5	-18.519	-13.9833	-21.0333	4.7	
	1.000	1.000	1.000	1.000	
6	-40.1524	-35.6167	-42.6667	-16.9333	-21.6333
	0.400	0.591	0.054	1.000	1.000

Análisis de varianza de una sola vía y comparación múltiple de Bonferroni para la variable de diámetro a través de los siguientes comandos en StataSE 11:

```
. sumdia
```

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
dia	75	8.533333	3.456617	0	15.5

. graph box dia, over (trat)



. robvardia, by (trat)

Summary of Diametro			
Tratamiento	Mean	Std. Dev.	Freq.
1	9.5	.95742711	7
2	10.5625	.8634441	8
3	9.4333333	1.3210746	15
4	7.3333333	3.9490807	15
5	9.3333333	2.7494588	15
6	6.5	5.2098807	15
Total	8.5333333	3.4566166	75

W0 = 7.4356705 df(5, 69) Pr> F = 0.00001254

W50 = 4.3817262df(5, 69) **Pr> F = 0.00159976**

W10 = 8.2006242df(5, 69) Pr> F = 0.00000403

. onewaydiatrat, means bonferroni

| Summary of
 | Diametro
 Tratamiento | Mean

```
-----+-----
1 | 9.5
2 | 10.5625
3 | 9.4333333
4 | 7.3333333
5 | 9.3333333
6 | 6.5
-----+-----
Total | 8.5333333
```

Analysis of Variance

Source	SS	df	MS	F	Prob> F
Between groups	144.847917	5	28.9695833	2.70	0.0273
Within groups	739.31875	69	10.7147645		
Total	884.166667	74	11.9481982		

Bartlett's test for equal variances: $\chi^2(5) = 43.7373$ Prob> $\chi^2 = 0.000$

Comparison of Diametro by Tratamiento
 (Bonferroni)

Row Mean-	1	2	3	4	5
Col Mean					
2	1.0625				
	1.000				
3	-.066667	-1.12917			
	1.000	1.000			
4	-2.16667	-3.22917	-2.1		
	1.000	0.411	1.000		

```

5 | -.166667 -1.22917 -.1 2
   | 1.000 1.000 1.000 1.000
6 | -.3 -4.0625 -2.93333 -.833333 -2.83333
   | 0.738 0.090 0.250 1.000 0.308

```

Análisis de varianza de una sola vía y comparación múltiple de Bonferroni para la variable de diámetro a través de los siguientes comandos en StataSE 11:

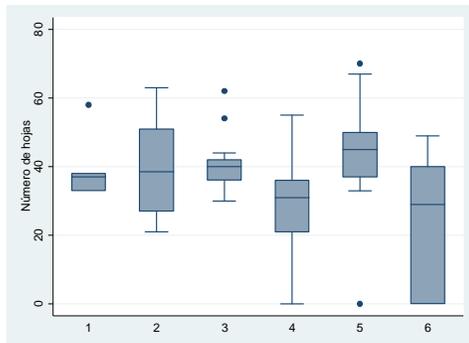
```
. sumnhoja
```

```

Variable | Obs Mean Std. Dev. Min Max
-----+-----
nhoja | 75 34.92 16.27364 0 70

```

```
. graph box nhoja, over (trat)
```



```
. robvarnhoja, by (trat)
```

```

| Summary of Número de hojas
Tratamiento | Mean Std. Dev. Freq.
-----+-----
1 | 38.857143 8.668498 7
2 | 39.625 15.004166 8
3 | 40.733333 8.0219936 15
4 | 27.133333 16.026169 15
5 | 43.266667 16.006546 15
6 | 24.2 18.929191 15

```

-----+-----
 Total | 34.92 16.27364 75

W0 = 2.6027335 df(5, 69) Pr> F = 0.03246604

W50 = 2.0539036df(5, 69) **Pr> F = 0.08178938**

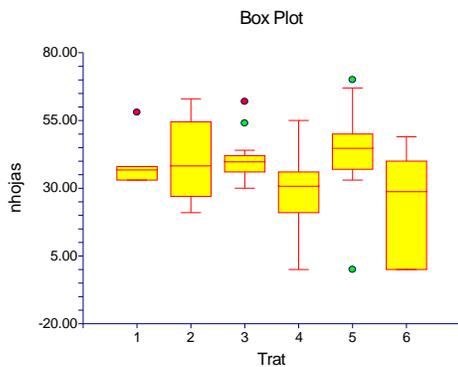
W10 = 3.2616459 df(5, 69) Pr > F = 0.01058103

Debido a que no se cumple la homocedasticidad se procede a tratar los datos del número de hojas con análisis de varianza de Kruskal-Wallis y una comparación múltiple de Bonferroni a través del software estadístico NCSS Data.

Tests of Assumptions Section

Assumption	Test Value	Prob Level	Decision (0.05)
Skewness Normality of Residuals	-1.5018	0.133154	Accept
Kurtosis Normality of Residuals	0.9608	0.336647	Accept
Omnibus Normality of Residuals	3.1785	0.204078	Accept
Modified-Levene Equal-Variance Test	2.0539	0.081789	Accept

Box PlotSection



Expected Mean Squares Section

Source	Term	DF	Term Fixed?	Denominator Term	Expected Mean Square
A: Trat		5	Yes	S(A)	S+sA
S(A)		69	No		S(A)

Note: Expected Mean Squares are for the balanced cell-frequency case.

Analysis of Variance Table

Source	Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Power
A: Trat		5	4470.788	894.1576	4.08	0.002656*	
						0.938606	

S(A)	69	15126.73	219.228
Total (Adjusted)	74	19597.52	
Total	75		

* Term significant at alpha = 0.05

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

Ho: All medians are equal.

Ha: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Square (H)	Prob Level	
Not Corrected for Ties	5	17.9749	0.002978	Reject Ho
Corrected for Ties	5	18.04729	0.002888	Reject Ho
Number Sets of Ties	17			
Multiplicity Factor	1692			

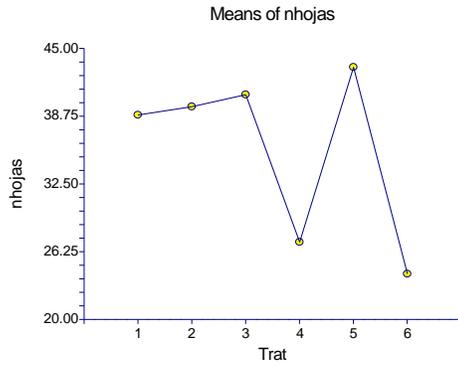
Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
1	7	279.00	39.86	0.2368	37
2	8	328.00	41.00	0.4119	38.5
3	15	691.50	46.10	1.6093	40
4	15	374.50	24.97	-2.5895	31
5	15	779.50	51.97	2.7749	45
6	15	397.50	26.50	-2.2848	29

Means and Effects Section

Term	Count	Mean	Standard Error	Effect
All	75	34.92		2.850873
A: Trat				
1	7	38.85714	5.596274	36.00627
2	8	39.625	5.234835	36.77413
3	15	40.73333	3.822983	37.88246
4	15	27.13333	3.822983	24.28246
5	15	43.26667	3.822983	40.41579
6	15	24.2	3.822983	21.34913

Plots of Means Section



Bonferroni (All-Pairwise) Multiple Comparison Test

Response: nhojas
Term A: Trat

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=69 MSE=219.228 Critical Value=3.040827

Group	Count	Mean	Different From Groups
6	15	24.2	3, 5
4	15	27.13333	
1	7	38.85714	
2	8	39.625	
3	15	40.73333	6
5	15	43.26667	6

Bonferroni (With Control) Multiple-Comparison Test

Response: nhojas
Term A: Trat

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=69 MSE=219.228 Critical Value=2.648977

Group	Count	Mean	Different From Groups
6	15	24.2	3, 5
4	15	27.13333	5
1	7	38.85714	
2	8	39.625	
3	15	40.73333	6
5	15	43.26667	6, 4

Prueba exacta de Fisher para la variable de supervivencia a través del siguiente comando en StataSE 11:

```
. tab trata porcen, chi2 rowexact
```

```
+-----+
| Key    |
|-----|
| frequency |
| row percentage |
+-----+
```

Enumerating sample-space combinations:

stage 6: enumerations = 1

stage 5: enumerations = 4

stage 4: enumerations = 17

stage 3: enumerations = 57

stage 2: enumerations = 55

stage 1: enumerations = 0

Porcentaje de			
Tratamiento		supervivencia	
0	1	Total	
1	0	7	7
	0.00	100.00	100.00
2	0	8	8
	0.00	100.00	100.00
3	0	15	15
	0.00	100.00	100.00
4	3	12	15

		20.00	80.00		100.00
-----+-----+-----					
5		1	14		15
		6.67	93.33		100.00
-----+-----+-----					
6		5	10		15
		33.33	66.67		100.00
-----+-----+-----					
Total		9	66		75
		12.00	88.00		100.00

Pearson chi2(5) = 11.8687 Pr = 0.037

Fisher's exact = 0.046

. saveanalysisdatos, replace

fileanalysisdatos.dta saved