



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**INSTITUTO DE GEOLOGÍA**  
**ECOLOGÍA Y MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS**

**ABSORCIÓN DE METALES POR LECHUGA (*LACTUCA SATIVA* L.) CULTIVADA**  
**EN CHINAMPAS DE SAN GREGORIO ATLAPULCO XOCHIMILCO.**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

**HORACIO DAVID CARRANZA BAUTISTA**

**TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: SILKE CRAM HEYDRICH**

**INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM.**

**COMITÉ TUTOR:**

**DRA. CHRISTINA DESIREÉ SIEBE GRABACH**

**INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM**

**DRA. CLAUDIA ALEJANDRA PONCE DE LEÓN HILL**

**FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM**

**MÉXICO, CDMX, Agosto, 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



## **AGRADECIMIENTOS**

### **Al Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM**

El haberme brindado la oportunidad de formarme y crecer, académicamente y como persona.

### **CONACYT**

El apoyo recibido a través de la beca (CVU 440740).

### **PAPIIT DGAPA IN104614**

“Efecto de las características del suelo sobre la disponibilidad de metales y su absorción en un cultivo urbano”.

### **Dra. Silke Cram Heydrich.**

El haber creído en mí, su entusiasmo e interés en este proyecto, porque sin usted este trabajo nunca se hubiera podido realizar, gracias por la buena convivencia que siempre se dio y favoreció con su buen carácter y humor que le caracteriza.

### **Dra. Claudia Ponce de León Hill.**

Quien me apoyo con un espacio en el UNAAMB, me ha brindado su confianza y la oportunidad de desarrollarme en el ámbito profesional, al incluirme en los proyectos que se generan en este espacio.

### **Dra. Christina Siebe Grabach.**

Quien con su conocimiento y experiencia en el tema, realizó correcciones y observaciones puntuales a este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS A TÍTULO PERSONAL**

### **Dra. Cecilia Vanegas Pérez.**

Su enorme interés en el proyecto, puntos de vista y observaciones, pero sobre todo su confianza y su consideración en incluirme siempre en su equipo de trabajo.

### **M. en C. Manuel Hernández Quiroz.**

Apoyo en la determinación de metales en tejido vegetal y muestras en suelo.

### **M. en C. María del Pilar Fernández Lomelín**

Su apoyo, motivación y la amabilidad con la que siempre me ha recibido, así como la dedicación en la corrección del texto y sus observaciones.

### **Dra. Olivia Zamora Martínez**

Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM 2014 por la determinación de aniones y cationes.

### **M. en C. Kumiko Shimada Miyasaka.**

Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM 2014 por la determinación de  $C_t$  y  $N_t$ .

### **Geógrafo David León Gutiérrez.**

A poyo en el procesamiento de muestras para la determinación de CIC.

### **Dra. Amada Laura Reyes Ortigoza y la M. en C. María del Socorro Galicia Palacios.**

Apoyo en la determinación de parámetros fisicoquímicos en muestras de suelo.

### **M. en C. Sebastián Zúñiga Lagunes, a la Biol. Jocelyn Bustamante Valdez y la M. en C. Irene Sommer.**

Su ayuda en la revisión de datos en la parte estadística.

### **M. en C. Blanca Gonzáles.**

Sus apoyo en la construcción e instalación de los electrodos de potencial redox.

### **Al personal del Posgrado de Ciencias Biológicas: la Dra. María del Coro, Dr. Armando Rodríguez, M. en C. Gabriela Diego, Lilia Jiménez, María Rodríguez y Lilia Espinosa.**

Su buena disposición y atenciones con mi persona.

### **Don Adrián y a Javier Gonzáles Propietario de la chinampa de estudio y agricultor.**

Por las facilidades brindadas para la realización de este proyecto.

### **Unidad de Análisis Ambiental del departamento de Ecología y Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias, UNAM 2014.**

El espacio para la preparación de muestras y el uso de equipos.

## **DEDICATORIA**

### **A mi Madre: Rosa Irma Bautista Villanueva**

Su gran apoyo, quien todos los días se levanta y me motiva a continuar adelante, siempre su ejemplo de entereza, fortaleza y de rectitud.

### **Mi familia:**

Que aunque no los veo muy seguido, se que están ahí para apoyarme y darme ánimos. Mi hermana Lily y mis sobrinos, así como mis tías primas y primos.

### **Lupita Velarde Aguilar:**

Por impulsarme a dar el salto en esta aventura, gracias Lupix por los bonitos recuerdos que siempre tendré en mi mente y mi corazón.

### **Carolina Cadenas:**

El gran cariño que me has tenido en estos últimos años.

### **Mis grandes Amigos: David león, Ramces de Jesus, Miguel Hernández, Fabiola Rodríguez, Pilar Suárez, Manuel Hernández.**

Que siempre hemos pasado grandes momentos, me han apoyado y han tenido palabras de aliento para sacar el día a día.

### **A los amigos del laboratorio que compartimos el mismo sueño de poder terminar una tesis: Jocelyn Bustamante, Diego Ruiz y Giovanni Aldana.**

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	XII
<b>ABSTRACT</b> .....	XIV
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Agricultura urbana.....	1
1.2 Seguridad alimentaria e inocuidad .....	2
1.3 Límites máximos permitidos de metales en vegetales establecidos por FAO/ WHO ..	3
1.4 Uso de aguas residuales y tratadas en la agricultura urbana.....	3
1.5 Riesgo de utilizar aguas residuales tratadas con un alto contenido de sales .....	4
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	5
2.1 Los metales en el ambiente.....	5
2.2 Mecanismos de evasión y tolerancia de las plantas frente a la toxicidad de los metales .....	14
2.3 Mecanismos celulares de absorción de metales por las plantas .....	15
2.4 Absorción de metales en lechuga .....	18
<b>3. ANTECEDENTES DE XOCHIMILCO</b> .....	19
3.1 Zona chinampera de Xochimilco.....	20
3.2 Problemática de Xochimilco .....	21
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b> .....	24
<b>5. OBJETIVO</b> .....	25
Objetivos Particulares.....	25
<b>6. HIPÓTESIS</b> .....	26
SUELO .....	26
PLANTA .....	27
<b>7. MÉTODOS</b> .....	28
7.1 Construcción de electrodos de platino.....	29
7.2 Instalación de electrodos Redox y registro.....	29
7.3 Toma de muestras de suelo y lechuga .....	30
7.4 Análisis de laboratorio.....	31
7.5 Análisis estadístico: .....	38
<b>8. RESULTADOS</b> .....	39
8.1 Manejo de la chinampa.....	39
8.2 Descripción del suelo.....	40
8.3 Características del suelo superficial en la temporada de secas y de lluvias .....	49
8.4 Mediciones de potencial redox.....	52
8.5 Cationes y aniones disueltos.....	55
8.6 Concentración de metales en suelo.....	57
8.7 Concentración de metales en tejido de lechuga.....	65
<b>9. DISCUSIÓN</b> .....	72
9.1 Características del suelo .....	72
9.2 Características del suelo en temporada de secas y lluvias.....	74
9.3 Efecto del potencial óxido-reducción (redox) .....	75
9.4 Concentración de metales totales en el suelo .....	76
9.5 Movilidad de los metales.....	77
9.6 Incorporación de metales en cultivo de lechuga.....	88
9.7 Translocación de los metales.....	90
9.8 Calidad de lechugas para su consumo .....	99
<b>10. CONCLUSIONES</b> .....	101
<b>11. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	103
<b>ANEXOS</b> .....	121

1. Ficha técnica de la lechuga ( <i>Lactuca sativa</i> L.).....	121
2. Biomasa generada por las lechugas.....	122
3. Descripción de las características de los metales de interés.....	125
4. Características superficiales del suelo por temporadas.....	127
5. Cationes extractables (acetato de amonio) en suelo por temporadas.....	127
6. Cationes y aniones en pasta de saturación por temporadas.....	128
7. Calendario de manejo de la parcela.....	128
8. Porcentajes de recuperación de metales en suelo y planta.....	129
9. Concentración de metales en organismos adultos por temporadas.....	129
10. Factor de transferencia y translocación de metales.....	130
11. Fraccionamiento de metales en suelo.....	130
12. Resultados de la prueba t-Student para determinar diferencias entre temporadas realizadas a los diferentes parámetros medidos en suelo.....	132
13. Resultados del análisis multivariante para determinar diferencias en la concentración del metal entre estadios vegetativos y órganos en diferentes temporadas.....	132
14. Resultados del análisis multivariante para determinar diferencias entre la concentración de metales en suelo de la fracción soluble e intercambiable entre temporadas.....	138

<b>Tablas</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
Tabla 1	Límite máximo permitido (LMP) de cadmio (mg/kg) en vegetales que se consumen en países europeos.	<b>2</b>
Tabla 2	Concentraciones o límites máximos permisibles (LMP) de metales (mg/kg) en vegetales determinados por FAO/ WHO.	<b>3</b>
Tabla 3	Concentración de algunos metales (mg/L) en el efluente de las plantas que abastecen los canales en la zona chinampera de Xochimilco.	<b>4</b>
Tabla 4	Comparación de algunos valores de fondo para metales en suelos	<b>6</b>
Tabla 5	Clasificación de suelos con base en los valores de óxido-reducción	<b>13</b>
Tabla 6	Valores de potenciales de oxidación-reducción (Eh) necesarios para reducir formas oxidadas de varios aceptores de electrones alternativos en suelos	<b>14</b>
Tabla 7	Reducción de la superficie cultivada en la zona chinampera (has.)	<b>22</b>
Tabla 8	Concentración de algunos elementos potencialmente tóxicos (mg/L) medidos en el agua de uno de los canales de la zona de Xochimilco	<b>23</b>
Tabla 9	Concentración de metales (mg/kg) en suelos y hojas de lechuga bajo diferentes condiciones de iluminación solar.	<b>23</b>
Tabla 10	Concentración de metales (mg/kg) en suelos y algunas especies vegetales en la zona de Xochimilco	<b>23</b>
Tabla 11	Resumen del proceso de extracción secuencial de metales empleado	<b>35</b>
Tabla 12	Condiciones del horno de microondas para la digestión de suelo	<b>36</b>
Tabla 13	Condiciones del horno de microondas para la digestión de hojas	<b>36</b>
Tabla 14	Condiciones del horno de microondas para la digestión de raíces	<b>37</b>
Tabla 15	Aporte de nutrimentos y algunos metales en estiércol de caballo	<b>73</b>
Tabla 16	Comparación de la concentración de metales totales en suelo (mg/kg) de San Gregorio Atlapulco con diferentes normas que establecen límites permisibles de metales en suelos agrícolas	<b>77</b>
Tabla 17	Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del	<b>78</b>



	Cu en temporada de secas	
Tabla 18	Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del Pb en temporada de secas	<b>78</b>
Tabla 19	Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del Zn en temporada de secas	<b>79</b>
Tabla 20	Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del Cu en temporada de lluvias	<b>80</b>
Tabla 21	Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del Pb en temporada de lluvias	<b>80</b>
Tabla 22	Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del Zn en temporada de lluvias	<b>81</b>
Tabla 23	Constantes de formación o estabilidad para los posibles complejos que puede formar el cadmio	<b>87</b>
Tabla 24	Comparación del factor de transferencia en lechugas con lo reportado por otros autores.	<b>89</b>
Tabla 25	Factores de translocación de metales de la raíz a las hojas para cada uno de los estadíos en época seca y de lluvia.	<b>91</b>
Tabla 26	Concentraciones o límites máximos permisibles (LMP) mg/kg de metal en vegetales determinados por FAO/ WHO	<b>100</b>

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
Figura 1	Esquema general de los factores que determinan la movilidad y la biodisponibilidad de los metales en el suelo	<b>9</b>
Figura 2	Esquema del fraccionamiento de la materia orgánica del suelo	<b>11</b>
Figura 3	Esquema de corte transversal de la raíz muestra las vías de absorción de metales y esquema general del sistema de transporte transmembrana	<b>16</b>
Figura 4	Representación esquemática de la absorción y el transporte de los metales en las plantas	<b>14</b>
Figura 5	Esquema de una Chinampa	<b>19</b>
Figura 6	Diagrama de actividades realizadas en este trabajo.	<b>28</b>
Figura 7	Ubicación de la chinampa y esquema de localización del perfil descrito, de los sitios donde se instalaron los electrodos y la subdivisión que se hizo de la parcela para tomar muestras compuestas de suelo superficial y lechugas	<b>29</b>
Figura 8	Instalación de electrodos en uno de los sitios de monitoreo con electrodos de platino para la medición de (POR) y Esquema de electrodos de platino	<b>30</b>
Figura 9	Proceso de manejo de la chinampa y aplicación de abono	<b>40</b>
Figura 10	Fertilizantes aplicados por el agricultor en el manejo de la chinampa	<b>40</b>
Figura 11	Parcela de estudio, ubicada en la zona chinampera de San Gregorio Atlapulco	<b>41</b>
Figura 12	Vista de la calicata realizada al centro de la chinampa de estudio	<b>43</b>
Figura 13	Distribución del tamaño de partículas en el perfil de suelo	<b>44</b>
Figura 14	Distribución de los valores de densidad y porosidad del suelo a profundidad	<b>45</b>
Figura 15	Distribución del nitrógeno y Carbono orgánico particulado y disuelto en el perfil de suelo.	<b>46</b>
Figura 16	Distribución de los valores de pH en el perfil del suelo	<b>46</b>

Figura 17	Distribución de conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable en el perfil	<b>47</b>
Figura 18	Distribución de las Bases intercambiables en el perfil	<b>48</b>
Figura 19	Distribución de la Capacidad de intercambio catiónico total en el perfil	<b>48</b>
Figura 20	Comparación de valores de pH en suelo superficial de chinampa entre temporadas.	<b>49</b>
Figura 21	Comparación de valores de $C_t$ en suelo superficial de chinampa entre temporadas.	<b>49</b>
Figura 22	Comparación de valores de Carbono Orgánico Disuelto en suelo superficial de chinampa entre temporadas	<b>50</b>
Figura 23	Comparación de valores de nitrógeno en suelo superficial de chinampa entre temporadas.	<b>50</b>
Figura 24	Comparación de valores de CIC en suelo superficial de chinampa entre temporadas	<b>51</b>
Figura 25	Comparación de valores de PSI en suelo superficial de chinampa entre temporadas.	<b>51</b>
Figura 26	Potencial redox medido a lo largo de dos temporadas (seca y lluvia) en 4 profundidades de un perfil de suelo en el centro de la chinampa (P1).	<b>52</b>
Figura 27	Potencial redox medido a lo largo de dos temporadas (seca y lluvia) en 4 profundidades de un perfil de suelo en la orilla de la chinampa “cercano al canal” (P2).	<b>53</b>
Figura 28	Comparación de valores de POR entre temporadas	<b>54</b>
Figura 29	Comparación de valores de temperatura entre temporadas.	<b>54</b>
Figura 30	Comparación de valores de precipitación entre temporadas.	<b>55</b>
Figura 31	Comparación de valores de cationes extractables entre temporadas.	<b>55</b>
Figura 32	Comparación de la concentración de cationes en pasta de saturación entre temporadas	<b>56</b>
Figura 33	Comparación de las concentraciones de aniones en pasta de saturación entre temporadas	<b>56</b>
Figura 34	Distribución de la concentración de metales a lo largo del perfil	<b>58</b>
Figura 35	Distribución de % cadmio a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo	<b>59</b>
Figura 36	Distribución de % plomo a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo	<b>59</b>
Figura 37	Distribución de % cromo a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo	<b>60</b>
Figura 38	Distribución de % cobre a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo	<b>60</b>
Figura 39	Distribución de % zinc a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo	<b>61</b>
Figura 40	Distribución de % manganeso a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo	<b>61</b>
Figura 41	Distribución de % Hierro a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo	<b>62</b>
Figura 42	Concentración de metales solubles e intercambiables en temporada de seca y lluvia.	<b>64</b>
Figura 43	Comparación de la acumulación de cadmio en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias	<b>65</b>
Figura 44	Comparación de la acumulación de plomo en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias	<b>66</b>

Figura 45	Comparación de la acumulación de cromo en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias	<b>67</b>
Figura 46	Comparación de la acumulación de cobre en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias	<b>67</b>
Figura 47	Comparación de la acumulación de zinc en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias	<b>68</b>
Figura 48	Comparación de la acumulación de manganeso en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias	<b>69</b>
Figura 49	Comparación de la acumulación de hierro en tejidos (hojas y raíz) en 3 etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias	<b>69</b>
Figura 50	Comparación del peso fresco registrados en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias	<b>70</b>
Figura 51	Comparación de talla registradas en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas	<b>70</b>
Figura 52	Comparación de talla registradas en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de lluvias	<b>71</b>
Figura 53	orden de magnitud de acumulación de metales por organismo (acumulación en hojas y raíces)	<b>71</b>
Figura 54	Comparación de la concentración de los metales en suelo superficial temporada de secas y lluvias con los valores promedio reportados por diferentes autores	<b>77</b>
Figura 55	Correlación entre la materia orgánica y el Cu soluble.	<b>78</b>
Figura 56	Correlación entre el carbón orgánico disuelto y Corg con respecto al Pb soluble.	<b>79</b>
Figura 57	Correlación entre el pH y el Zn soluble.	<b>79</b>
Figura 58	Correlación entre el pH y COD con respecto al Cu soluble.	<b>80</b>
Figura 59	Correlación entre el pH con respecto al Pb soluble.	<b>81</b>
Figura 60	Correlación entre el pH y Corg con respecto al Zn soluble.	<b>81</b>
Figura 61	Porcentaje de metales asociados a las diferentes fracciones del suelo	<b>83</b>
Figura 62	Esquema del grado de disponibilidad que presentan algunos metales en función al pH.	<b>84</b>
Figura 63	Diagramas de estabilidad E-pH (Pourbaix) para Mn.	<b>85</b>
Figura 64	Diagramas de estabilidad Eh-pH (Pourbaix) para Fe.	<b>85</b>
Figura 65	Diagramas de estabilidad Eh-pH (Pourbaix) para Cr.	<b>86</b>
Figura 66	Bio-acumulación de Cd durante las tres etapas de crecimiento de lechugas en temporada de lluvias y secas.	<b>94</b>
Figura 67	Bio-acumulación de Cu y Cr durante las tres etapas de crecimiento de lechugas en temporada de lluvias y secas.	<b>95</b>
Figura 68	Bio-acumulación de Pb, Mn y Fe durante las tres etapas de crecimiento de lechugas en temporada de lluvias y secas	<b>96</b>
Figura 69	Bio-acumulación de Zn durante las tres etapas de crecimiento de lechugas en temporada de lluvias y secas	<b>97</b>
Figura 70	Esquema Desarrollo del ciclo vegetativo de un cultivo y la tasa de evapotranspiración,	<b>98</b>

## RESUMEN

Actualmente la zona chinampera de Xochimilco es un área importante de agricultura urbana, que tiene sus orígenes en los agroecosistemas de chinampas prehispánicas y que gradualmente se fue urbanizando. Las chinampas fueron construidas artificialmente en zonas del lago de Xochimilco y actualmente siguen siendo fertilizadas con el sedimento de los canales y regadas con agua de los mismos. El agua de los canales provenía de manantiales, pero el agotamiento de éstos para proveer de agua potable a la ciudad llevo a recargarlos con agua de plantas de tratamiento residuales y así mantener el nivel de agua en los canales lo que ocasiona la entrada de contaminantes al sistema, entre ellos metales. Las características que tiene el suelo de Xochimilco (pH ligeramente alcalino y altos contenidos de materia orgánica) le brindan una alta capacidad amortiguadora y se espera que los metales en el suelo no se encuentren de forma disponibles para los cultivos.

Se evaluaron las principales características físicas y químicas del suelo que influyen en la movilidad de los metales, se midieron las concentraciones totales de Cd, Pb, Cr, Cu, Zn, Mn y Fe y se determinó mediante una extracción secuencial a que fracción del suelo se encuentran asociados, para analizar su grado de disponibilidad.

Se cuantificó el contenido de metales en raíz y hojas en tres fases vegetativas (plántula, juvenil y adulto) de lechuga (*Lactuca sativa*), que es uno de los cultivos más importantes que se produce en la zona. Esto se hizo durante dos ciclos agrícolas (en lluvias y secas) para conocer si hay diferencias en la incorporación de metales. La calidad de las lechugas en etapa de consumo, se comparó con la normativa internacional Codex alimentarius elaborada por FAO/WHO.

Los resultados muestran diferencias significativas entre temporadas ya que en la temporada de seca los valores son más altos para el pH, COD, bases intercambiables (Ca, Mg, K, Na), PSI, CE y los aniones Cl, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub>. En lluvias es más alta la CIC y no hubo diferencias en Ct, Nt y NO<sub>3</sub>.

Los contenidos de metales totales en temporada de secas y lluvias muestran el siguiente orden: Fe>Mn>Zn>Cr>Cu>Pb>Cd y se pudo determinar que estos se encuentran ligados a la fracción residual, tal es el caso del Cr, Fe y Mn, pero también se observó que hay un alto porcentaje del metal ligado a la fracción de materia orgánica para elementos como el Cd, Cu, Mn, Pb y Zn y es mínimo el porcentaje que se encuentra disponible.

En tanto que las concentraciones de metal disponible (soluble + intercambiable), se registró menor concentración en la fracción soluble que de forma intercambiable tanto en secas como en lluvias para todos los metales, al comparar las fracciones entre temporadas hay una mayor concentración de metal disponible en época de lluvias y el orden de magnitud ascendente en secas es Cd > Cr = Cu > Pb > Zn > Fe > Mn y en lluvia es: Cd > Cr > Pb > Cu > Zn > Mn > Fe. La fracción disponible representa entre el 0.1 y 10% dependiendo de la concentración del metal total en el suelo.

En temporada de secas fue mayor el grado de acumulación de metales en el tejido de las plantas con respecto a la temporada de lluvias y se encontró que fue mayor el grado de acumulación en raíces que en hojas, respecto a la acumulación de metales durante el ciclo vegetativo se observó que en la etapa de plántula presenta un menor grado de acumulación de metales con respecto a los otros dos estadios vegetativos, ya que en la etapa juvenil y adulto no presentaron diferencias entre si en el grado de acumulación de metal.

Al comparar la calidad de los cultivos de lechugas con respecto a los valores máximos de metales permitidos por la FAO/ WHO se registró que en temporada de secas los cultivos se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, pero en la temporada de lluvias el Pb y el Fe se encuentran por encima de los valores establecidos y el consumo de lechugas no cumple las normas internacionales establecidas por la FAO/ WHO.

## ABSTRACT

Currently the chinampas of Xochimilco are an important area of urban agriculture, which have its origins in prehispanic agro-ecosystems and have been gradually urbanized. The chinampas were artificially constructed in areas of Lake Xochimilco and they are fertilized with silt and irrigated with water from the canal.

The canal's water came from springs, but depletion of these to provide drinking water to the city led to reload with waste water treatment plants to keep the water level in the canals, which allowed the entry of contaminants into the system, including metals.

The features of the Xochimilco's soil (slightly alkaline pH and high content of organic matter) provide a high buffering capacity and it is expected that metals in the soil will not be available for crops.

The main physical and chemical feature of soil that influence the mobility of metals, were evaluated, also the total concentration of Cd, Pb, Cr, Cu, Zn, Mn and Fe were measured and the fraction of the soil at which is associated were determined by sequential extraction, to analyze the degree of availability.

Metal content in plants of Lettuce (*Lactuca sativa*), in roots and leaves in different life cycle stages (seedling, juvenile and adult) were determined. This plant is one of the most important crops produced in the area. Metals were quantified during two agricultural cycles (in dry and rainy season) to see if there are differences in the incorporation of metals. The quality of lettuce in consumption stage, was compared with international standards developed by *Codex Alimentarius* FAO/WHO.

The results show significant differences between the dry season and the rainy season and in the dry season values are higher: pH, COD, exchangeable bases (Ca, Mg, K, Na), PSI, CE and anions Cl, SO<sub>4</sub> and HCO<sub>3</sub>. Rain season has higher CIC and there were no differences in Ct, Nt and NO<sub>3</sub>.

The contents of total metals in the dry season and rainy show the following order: Fe> Mn>Zn> Cr> Cu> Pb> Cd and it was determined that these are linked to the residual fraction, in the case of Cr, Fe and Mn, there is a high percentage of metal bound to the fraction of organic matter for elements such as Cd, Cu, Mn, Pb and Zn and little percentage that is readily available.

The available metal concentration (soluble + exchangeable), has lower concentration in the soluble fraction than in the interchangeable fraction in both, dry and rainy season, for all metals. Comparing the fractions between seasons, there were higher concentrations of available metals in the rainy season. The order of magnitude of the available concentration in ascending order in the dry season: Cd> Cr = Cu> Pb> Zn> Fe> Mn, and in rainy season Cd> Cr> Pb> Cu> Zn> Mn> Fe. This available fraction represents between 0.1 and 10% depending on the total concentration of metal in soil

In the dry season there was higher accumulation of metals in the plant tissue with respect to the rainy season and the degree of accumulation in roots is greater than in leaves. Comparing the accumulation of metals during the vegetative cycle, the seedling stage has a lower accumulation of metals with respect to the other two vegetative stages (juvenile and adult) which showed no differences between the degree of accumulation of metal between them.

When compared the quality of crops of lettuce with respect to the maximum metal values allowed by FAO/WHO in dry season was found that crops are within the maximum permissible limits, but in the rainy season Pb and Fe are above the established values and human consumption of lettuce, not does meet international standards set by the FAO/WHO.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Agricultura urbana

Se considera como “agricultura urbana a la obtención de productos alimenticios, forraje, silvicultura y acuicultura dentro de zonas urbanas, que genera empleos e ingresos para los individuos o grupos de individuos, ayudando al saneamiento ambiental a través del reciclaje de aguas y sólidos de desecho, que además contribuye a mejorar la nutrición de la población” (Hernández, 2006). En el mismo contexto de agricultura urbana se maneja el término de agricultura peri urbana que se caracteriza por su desarrollo en amplios terrenos de la periferia de la ciudad, su producción está destinada al autoconsumo y al comercio local (Lugo-Morin, 2010; Ávila, 2004). A partir de la década de los 80's la agricultura urbana ha tomado una mayor importancia debido a la rápida expansión de las ciudades y por el crecimiento demográfico, tal es el caso de África y América Latina (Soriano, 2005).

La expansión urbana requiere del terreno necesario para la habitación, la industria, el transporte y las actividades de recreación, por lo que aumenta la presión sobre los recursos terrestres. La degradación de tierras, el entubamiento de los ríos y la contaminación del suelo por la lluvia ácida y los desechos industriales son algunas de las cuestiones ambientales asociadas con la urbanización y la industrialización (PNUMA, 2002). Además, la zona urbana está en constante expansión y el área rural disminuye, por lo que las personas que viven en el área rural tienen menos espacio para cultivar. El abasto de alimento se complica en las zonas inmediatas y se requiere transportar los alimentos cada vez de distancias más largas (Bindi *et al.*, 2012).

Se reconoce que la agricultura urbana es un medio para que las grandes urbes sean más sustentables. En este sentido, si una ciudad fuese capaz de producir parte de sus alimentos, reduciría su huella ecológica (U.N. Hábitat II, 1996).

La agricultura urbana en la ciudad de México comparte características con otros países subdesarrollados. Sin embargo, resulta que en el valle de México se da un caso excepcional porque los sistemas productivos urbanos datan de tiempos prehispánicos. Las chinampas continúan cultivándose a la fecha y se han diversificado en huertos familiares y, más recientemente, se han implementado invernaderos para cultivos comerciales a lo largo de todo el año (Merlín-Uribe *et al.*, 2013).

Tal como sucede con la agricultura rural, la agricultura urbana y peri-urbana implica riesgos para la salud de la población si no es manejada apropiadamente. Existen riesgos de enfermedades asociadas con la reutilización de desechos urbanos y aguas residuales que puede contaminar los alimentos. Además el uso intensivo de fertilizantes y pesticidas son fuente de contaminación de metales al suelo. Existe una relación estrecha entre agricultura urbana y seguridad alimenticia ya que involucra aspectos económicos, sociales y ambientales (Giuffré *et al.*, 2005; Stewart *et al.*, 2013). En este sentido la seguridad alimentaria e inocuidad se encuentra vinculada con el concepto de agricultura urbana, lo



que significa que el alimento esté disponible en cualquier momento, que todas las personas tengan medios de acceso a éste y que sea nutricionalmente adecuado en términos de **calidad**, **cantidad** y **variedad**. Una población puede considerarse “segura alimentariamente” si estas condiciones tienen lugar (Soriano, 2005).

## 1.2 Seguridad alimentaria e inocuidad

La seguridad alimentaria se ha convertido en una preocupación creciente en las ciudades (Soriano, 2005) debido al gran crecimiento urbano. Se ha reportado en el 2015 que el 54% de la población mundial vive en zonas urbanas (WHO, 2015). Los problemas de la seguridad alimentaria y la nutrición tienen grandes implicaciones, particularmente en los países de bajos y medianos ingresos, por lo que la agricultura urbana constituye una estrategia válida para mejorar la nutrición humana, el autoconsumo familiar, la generación de ingresos, el ahorro y las condiciones de vida, que contribuye a resolver los problemas de abastecimiento de alimentos en áreas urbanas y periurbanas (Seija, 2011).

Los defensores de la agricultura urbana alegan que además de suministrar alimentos, la actividad puede contribuir a mejorar el medio ambiente por medio del reciclaje de materia orgánica, en donde se pueden convertir los desechos sólidos en composta para fertilizar los suelos y reducir la presión sobre las tierras de cultivo (PNUMA, 2002).

Para poder garantizar la calidad e inocuidad de los alimentos durante los años 70’s y finales de los 80’s, se empezó a monitorear una amplia variedad de alimentos en 21 países, el problema inicial era que cada uno de ellos implementaba sus propios criterios. Para ejemplificar este problema se muestran en la tabla 1 los límites máximos permitidos de cadmio en vegetales establecido en varios países de Europa; a raíz de lo anterior, surgió la necesidad de tener una normativa estandarizada (OECD, 1994)

Tabla 1. Límite máximo permitido (LMP) de cadmio (mg/kg) en vegetales que se consumen en países europeos.

Vegetales	Reino Unido 1983	Finlandia 1980	Suecia 1984	Dinamarca 1979	Países Bajos 1988
Col	<0.01	0.005	0.004	0.01	ND
Coliflor	<0.02	0.01	0.01	ND	ND
Espinacas	0.120	0.150	0.043	ND	ND
Brócoli	0.01	0.01	ND	ND	ND
Legumbres	<0.01-0.03	<0.002-0.03	0.001-0.004	0.015	ND
Lechugas	<0.06	0.05	0.029	0.043	ND
Papas	<0.03	0.03	0.016	0.03	0.03
Zanahorias	<0.05	0.03	0.041	ND	ND

(tomado de OECD, 1994). ND: Dato No Disponible

### ***1.3 Límites máximos permitidos de metales en vegetales establecidos por FAO/ WHO***

Actualmente hay una tendencia hacia la armonización de las regulaciones de alimentos con base en lo establecido por el Comité Mixto de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y la Organización Mundial de la Salud FAO/WHO por sus siglas en inglés y por el Comité de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA). Tal es el caso de países como Australia y Nueva Zelanda, o bloques continentales como el Mercosur y la Unión Europea entre otros, que han establecido regulaciones aplicables a todos los países miembros para establecer un procedimiento uniforme. En todos los casos, las respectivas autoridades deben garantizar que los alimentos consumidos y vendidos dentro de sus respectivos países sean seguros mediante el establecimiento de un marco regulatorio el cual haga cumplir las normas (Magnusson *et al.*, 2013). Así la tabla 2 muestra los límites máximos permisibles de metales en vegetales establecidos en el Codex alimentarius (2001).

Tabla 2. Concentraciones o límites máximos permisibles (LMP) de metales (mg/kg) en vegetales determinados por FAO/ WHO.

Metal	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
LMP	0.43	0.2	50	2.3	73.3	425.5	500	67.9	0.3	99.4

Codex alimentarius 2001.

La calidad y el contenido de metales que puedan presentar los cultivos, dependen de una gran variedad de factores, entre los cuales hay que destacar la especie vegetal, el tipo de suelo (características físico-químicas) y las condiciones climáticas (Peris, 2006).

La captación total de metales de una planta no debe asumirse como la tasa de incorporación de metales al organismo que lo consume, ya que se debe de evaluar únicamente la concentración de metales de las partes que se consumen directamente, ya sea la raíz, el tallo, las hojas o frutos, según sea el caso (Mapanda *et al.*, 2007).

### ***1.4 Uso de aguas residuales y tratadas en la agricultura urbana***

Actualmente la agricultura es el principal sector consumidor de recursos hídricos. La baja disponibilidad de agua hace que en algunas zonas sea necesario emplear otros recursos, como aguas residuales domésticas (Silva *et al.*, 2008) para el riego de cultivos agrícolas. Se ha visto que esto favorece la fertilidad del suelo y la provisión de macro y micro nutrientes, tales como N, P, Fe, Zn y Mn. Así mismo, aportan materia orgánica, y metales, como Pb, Cd, Ni y Cr en los suelos y plantas (Harati *et al.*, 2011). México ocupa uno de los primeros lugares en el mundo en el uso de aguas residuales para la agricultura con un consumo de 4,493,000 (m<sup>3</sup>/d) (Jiménez & Asano, 2008).

Se estima que una décima parte de la población del mundo consume alimentos provenientes de la agricultura urbana regados con aguas residuales, por lo que los suelos agrícolas se encuentran amenazados por la contaminación química debido a los desechos provenientes de los centros urbanos (Carr, 2005).

En México la calidad de los efluentes de plantas de tratamiento presentan una situación medianamente aceptable y Xochimilco no es la excepción (Riveros, 2013), ya que los metales a pesar de que cumplen con la normativa nacional e internacional (tabla 3) estos se están depositando de forma constante en el sistema de canales y lagos de la zona de Xochimilco

Tabla 3. Concentración de algunos metales (mg/L) en el efluente de las plantas que abastecen los canales en la zona chinampera de Xochimilco.

Planta de tratamiento de agua residual	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn
Cerro de la Estrella *	0.06	0.055	0.045	0.0007	0.086	0.054
Sn Lorenzo*	0.0009	0.055	0.045	0.0009	0.086	0.062
Sn Luis Tlaxiátemanco*	0.0017	0.055	0.045	0.0009	0.086	0.054
LMP NOM 001 ECOL (1996)	0.2	0.2	4	0.01	0.5	10
LMP FAO/WHO (1992)	0.1	0.01	0.2	ND	5	2

\* Riveros , 2013

LMP (Limite Máximo Permitido)

### ***1.5 Riesgo de utilizar aguas residuales tratadas con un alto contenido de sales***

El riesgo de utilizar aguas residuales tratadas también se relaciona con otras características, como los altos contenidos de sales, ya que puede aumentar la disponibilidad de metales y en muchas ocasiones esto ocurre conforme se incrementa la salinidad (Kadkhodaie *et al.*, 2012). El cloruro de sodio (NaCl) es una de las sales más comunes, la cual se disuelve en forma de cloruro (Cl<sup>-</sup>) y sodio (Na<sup>+</sup>) (Grattan, 2002); la presencia de estos iones da lugar a la interacción con algunos metales, como el cadmio, para formar el cloruro de cadmio (CdCl<sub>2</sub>) (Shahnawaz *et al.*, 2012), el cual facilita la absorción del cadmio por las plantas en condiciones salinas debido a que aumenta su solubilidad. Por lo anterior, en un suelo agrícola aún con niveles muy bajos de cadmio, se puede presentar una alta movilidad de este metal, lo cual, es una tendencia general para muchos cultivos (López-Chuken *et al.*, 2012).

## 2. MARCO TEÓRICO

### *2.1 Los metales en el ambiente*

Elementos como el Cd, Pb, Hg etc. se consideran contaminantes ambientales inorgánicos de gran importancia debido a sus efectos tóxicos sobre los organismos en general (Rajeswari & Sailaja, 2014). Estos elementos tienen la capacidad de impactar sistemas biológicos y terrestres, por su fácil incorporación, elevada toxicidad y permanencia en el ambiente. Comúnmente son llamados “metales pesados”, pero este término se ha empleado de manera inconsistente ya que agrupa a una serie de metales con características físicas y químicas totalmente heterogéneas. Lo anterior ha llevado a la confusión general, y es mejor evitar el término (Duffus, 2002). Para efectos de este trabajo solo se empleará el término de metales.

#### *Fuentes de los metales*

La contaminación ambiental por metales puede originarse a partir de fuentes naturales, así como por actividades antropogénicas. Las fuentes naturales pueden ser las erupciones volcánicas, los incendios forestales (Chhibber & Sharma, 2014), así como los procesos pedogenéticos de meteorización de materiales parentales (Wuana & Okieimen, 2011).

A escala global son las actividades antropogénicas las que han impactado al ambiente dispersando una gran cantidad de metales. Éstos se han estado acumulando en los diversos ecosistemas (Chhibber & Sharma, 2014) a un ritmo mucho mayor que por los procesos naturales (Ayres, 1992). La civilización moderna es completamente dependiente de una amplia gama de metales en todos los aspectos de la vida cotidiana. El uso de metales se aceleró durante la revolución industrial del siglo XIX, y desde entonces se han convertido en elementos "esenciales" para la sociedad moderna debido a la gama de productos en que son empleados (Tiller, 1989).

Dentro de las actividades antropogénicas, como la minería, la fundición de metales, la quema de carbón en centrales eléctricas, la disposición de lodos residuales, son consideradas de las fuentes más importantes de dispersión de metales en el ambiente (Myung, 2008; Dinis & Fiúza, 2011; Rajeswari & Sailaja, 2014).

Debido a la perturbación y la aceleración del ciclo geoquímico de los metales por el hombre, la mayoría de los suelos de los entornos rurales y urbanos presentan concentraciones de metales más altas que las de fondo geoquímico (Wei & Yang, 2010; Wuana & Okieimen, 2011). En centros urbanos diariamente son emitidos gran cantidad de metales mediante la combustión de combustibles fósiles en vehículos, el desgaste de elementos automotrices, las actividades industriales y la incineración de residuos sólidos, entre otros. Dichos elementos quedan suspendidos en el aire y son transportados a grandes distancias o simplemente se depositan y acumulan en pavimentos de carreteras y/o el suelo circundante, contaminando así suelos, cuerpos de aguas, etc. la exposición en exceso a los metales presentes en polvo o sedimentos a través de varias rutas que incluyen la ingesta,

inhalación y el contacto dérmico, puede presentar efectos tóxicos sobre todos los organismos (Järup, 2003; Yisa *et al.*, 2011).

### ***Concentraciones de fondo***

Para poder determinar los umbrales de toxicidad de los contaminantes en el suelo es necesario determinar los valores normales que presentan los suelos naturales no contaminados, lo que se ha determinado como fondo geoquímico. El fondo geoquímico se refiere a la concentración de un elemento que se encuentra en los suelos sin influencia humana y que se considera es un margen de la concentración natural de una sustancia en un medio específico teniendo en cuenta su variabilidad espacial y temporal (Gałuszka & Migaszewski, 2011).

En la tabla 4 se observan intervalos de concentraciones naturales de metales en el suelo que han propuesto varios autores y que se pueden tomar como una primera aproximación para determinar si un suelo está contaminado porque presenta concentraciones más elevadas.

Tabla 4. Comparación de algunos valores de fondo para metales en suelos

Elementos	Rango común de las concentraciones de metal en suelo (mg/kg)		
	1)	2)	3)
Cd Cadmio	0.01-0.70	0.05 - 1	0.1 - 0.41
Cu Cobre	2-100	10 - 40	38.9 - 55
Cr Cromo	1-1000	10 - 50	59.5 - 100
Fe Hierro	7,000-550,000	10,000 – 50,000	ND
Mn Manganeso	20-3,000	300 - 1000	488 - 900
Pb Plomo	2-200	10 - 30	15 - 27
Zn Cinc	10-300	20 - 200	3 - 70

ND (No Disponible) 1) McLean & Bledsoe, 1992 2) Blum *et al.*, 2012 3) Kabata-Pendias & Pendias, 2011.

Determinar las concentraciones de fondo de metales en los suelos es fundamental para el reconocimiento y la gestión de la contaminación del suelo, ya que al establecer dichos valores permiten determinar aquello que representa una contaminación. Pero el poder establecer dichos valores de forma general es difícil ya que las concentraciones de fondo de metales en los suelos pueden variar de forma natural en varios órdenes de magnitud entre un sitio y otro. Por otra parte, hay que considerar si presentan un aporte antrópico. De ahí que la determinación de las concentraciones de fondo de metales en los suelos es fundamental (Chen *et al.*, 1999; Hamon *et al.*, 2004).

### ***Especiación de metales en suelo***

El comportamiento de los metales en el suelo depende de cómo y a qué fase están ligados, a su forma química, que a su vez se relacionan con las características físicas, químicas y biológicas del sistema, dichos factores limitan su movilidad y su biodisponibilidad (Giacalone *et al.*, 2005). Se entiende por especiación a la caracterización de las formas químicas en las que un elemento está presente en el suelo, para comprender su transformación e inferir los procesos ambientales que la controlan (Ashraf *et al.*, 2012).

Se distinguen dos formas de especiación en los suelos, la química y la física: la química se define como el proceso de identificación y cuantificación de las formas químicas de un elemento en el suelo, y la física es importante en el estudio de la adsorción y la movilidad de los elementos en suelos (Dube *et al.*, 2001).

La especiación está dada por la reactividad biogeoquímica y fisicoquímica de los metales, ya que éstos son inestables bajo diversas condiciones del suelo y por ello relativamente fáciles de transformar, dependiendo de su afinidad a los diferentes componentes del suelo (Kabata-Pendias, 2004).

Si un elemento está enlazado débilmente a una especie química su índice de disponibilidad es alto, porque puede ser solubilizado con cambios ligeros en las condiciones ambientales del suelo, como una reducción del pH o del potencial redox. Pero cuando los metales se encuentran ligados fuertemente a una especie química, su estabilidad es muy alta y para que se conviertan a formas solubles se requieren de cambios muy drásticos en las condiciones ambientales (González *et al.*, 2009).

Es importante saber cuál es la especie dominante y a que fases del suelo se encuentran ligadas los metales. Para ello se han desarrollado métodos indirectos, como el de las extracciones secuenciales que utilizan extractantes parciales para la obtención de los metales que se encuentran ligados a las diferentes fracciones o formas de asociación del suelo. Este método ofrece información acerca del origen, disponibilidad, movilización y transporte de los metales en el suelo y es útil para distinguir entre metales de origen litogénico y metales de origen antropogénico. Los de origen antropogénico son aquellos que se obtienen en las primeras fracciones y los de origen litogénico se encuentran asociados en cualquiera de las fracciones en función de la historia geológica del área, aunque se obtienen principalmente en la fracción residual (Martínez *et al.*, 2002).

### ***Factores que afectan la movilidad y la biodisponibilidad de los metales en el suelo***

El suelo actúa como un sistema depurador capaz de impedir o disminuir la movilidad y disponibilidad de diversos contaminantes. Cada suelo tiene una capacidad de depuración que depende de sus características físicas y químicas (Díez *et al.*, 2002; Qiana *et al.*, 1996; Bruemmer *et al.*, 1986). Cuando se supera la capacidad de amortiguación del suelo deja de ser eficaz e incluso puede funcionar como “fuente” de sustancias tóxicas, tanto para los organismos que viven en él, como para los sistemas con los que se relaciona (Galán & Romero, 2008; Peris, 2006).

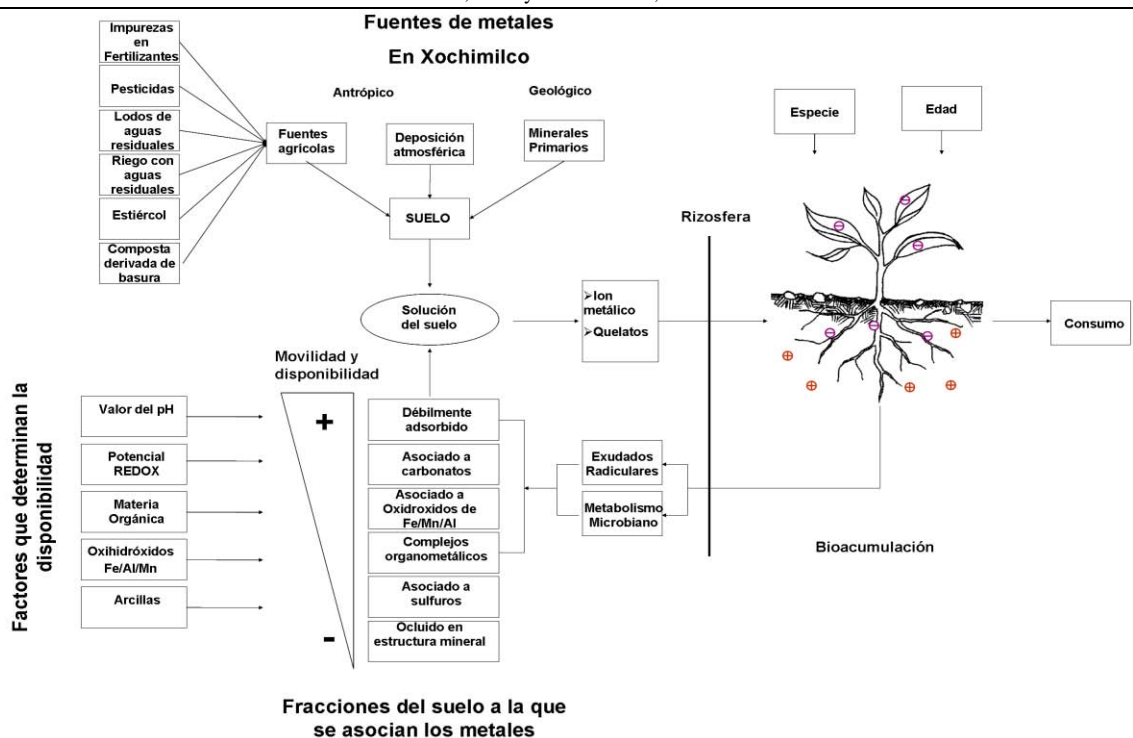
En términos generales, los metales en el suelo pueden seguir cuatro vías diferentes dependiendo de los procesos edáficos: I) ser fijados en el suelo, por procesos de adsorción, complejación y precipitación, II) estar solubles y ser absorbidos por las plantas, III) estar solubles y ser movilizados a aguas superficiales y/o subterráneas e IV) en el caso de elementos como Se, Hg y As, pasar a la atmósfera por volatilización (Bolan *et al.*, 2010).

Aunque no existe una definición única y clara respecto al término "biodisponibilidad" (Frische *et al.*, 2003), se refiere a la fracción de metales libres presente en la solución del suelo (McLean & Bledsoe, 1992) que está disponible para ser incorporada a los organismos. Esta disponibilidad es específica de las condiciones ambientales existentes en un sitio y es una propiedad dinámica que puede variar al cambiar éstas (Drexler, 2003).

La disponibilidad se rige por una serie de procesos interrelacionados, tales como reacciones de oxidación/reducción, precipitación/disolución y reacciones de adsorción/desorción (McLean & Bledsoe, 1992). Los cambios en las propiedades físicas, químicas o biológicas de los suelos afectan a la concentración de los metales que están en forma libre, lo que influye en su disponibilidad hacia los organismos; muchos de estos factores varían estacional y temporalmente, por lo que el cambio de un factor puede afectar a los otros (John & Leventhal, 1995) (figura 1).

Los metales se encuentran ligados a diferentes fracciones del suelo y dependiendo a cuál de estas fracciones están ligados presentan una cierta movilidad. Los metales presentes en la solución del suelo son aquellos que están libres y totalmente disponibles para los organismos. En el caso de los metales débilmente absorbidos y asociados a carbonatos (intercambiables) presentan una alta movilidad, ya que con un ligero cambio de pH pueden ser liberados. Los metales asociados con óxidos de Fe-Mn presentan una movilidad media y con cambios en las condiciones redox pueden ser liberados. Los metales asociados con la materia orgánica presentan una movilidad de media a alta, ya que con el tiempo, la descomposición u oxidación de la materia orgánica libera los metales. En el caso de aquellos metales asociados a sulfuros, la oxidación de minerales de sulfuro los puede liberar. Por último, los metales ocluidos en fase cristalina presentan una baja movilidad y sólo están disponibles después de que los minerales sean intemperizados (John & Leventhal, 1995; McLean & Bledsoe, 1992).

Figura 1. Esquema general de los factores que determinan la movilidad y la biodisponibilidad de los metales en el suelo. Modificado de Naidu *et al.*, 2008 y Krishnamurti, 2008



### Potencial de hidrógeno (pH):

El pH del suelo es uno de los factores principales que influyen en la adsorción de metales dado que controla procesos de solubilidad, precipitación, especiación y adsorción (Naidu & Bolan, 2008).

La reacción de la solución del suelo depende de la correlación de los iones hidrogeno ( $H^+$ ) e hidroxilo ( $OH^-$ ) causada por la protonación y desprotonación de minerales y materiales orgánicos; la concentración de iones  $H^+$  en la solución del suelo se expresa por medio del símbolo pH, el cual es el logaritmo negativo de la concentración de iones  $H^+$  es decir,  $pH = -\log [H^+]$ , por lo que cada incremento de pH tiene 10 veces más iones de hidrógeno que el incremento anterior (McCauley *et al.*, 2009).

A un pH bajo o ácido la concentración de iones  $H^+$  es mayor respecto a los iones hidroxilo. Bajo esta circunstancia los  $H^+$  desplazan eficazmente a los metales presentes en los sitios de intercambio de la fase sólida. Por el contrario a un pH alto o básico la concentración de iones hidroxilo  $OH^-$  son mayores con respecto a los protones, se caracteriza por la ausencia de protones libres en fase sólida, por lo que los sitios de intercambio se encuentran fácilmente disponibles para ser ocupados por cationes metálicos. Por lo tanto, los metales se verán atraídos a la fase sólida en lugar de permanecer en solución. Bajo estas condiciones los metales se puede hidrolizar formando  $MOH^+$  los cuales son fuertemente adsorbidos por el suelo (Pennisi & Thomas, 2012; Hamon & McLaughlin, 2003).



### ***Materia orgánica (MO):***

La calidad del suelo se ha convertido en un tema importante en la ciencia del suelo y debido a que la materia orgánica de los suelos se puede asociar a diferentes procesos físicos, químicos y biológicos del suelo, se ha considerado como uno de los mejores indicadores de calidad. El uso del suelo puede influir significativamente en la dinámica del carbono orgánico y del ciclo del N, P y S. Sin embargo, puede ser difícil detectar cambios en la calidad del carbono orgánico total debido a su variabilidad natural, por lo que se ha sugerido el carbono orgánico disuelto como un buen indicador, ya que es mucho más sensible. A pesar de que el carbón orgánico disuelto se considera que representa una pequeña porción del total de la materia orgánica en los suelos, es la fuente de carbono móvil más importante para los microorganismos, y puede reflejar fácilmente los efectos del uso del suelo (Azevedo, 2005).

Como materia orgánica del suelo se considera a los residuos de plantas y animales, a las sustancias sintetizadas a través del metabolismo microbiano y las reacciones químicas, así como a la biomasa microbiana (Hernández-Soriano *et al.*, 2013). La materia orgánica forma parte importante en el reciclaje de nutrientes y en la productividad del suelo. Cuando los residuos de plantas y animales se incorporan al suelo sufren un proceso de descomposición física y química, transformando la materia orgánica a elementos más sencillos y es lo que se conoce como humificación, que depende de los organismos del suelo, el entorno físico y la calidad de la materia orgánica (Mendonça, 2001).

La materia orgánica del suelo está conformada (figura 2) principalmente por sustancias no húmicas que consta de aquellas moléculas orgánicas liberadas directamente a partir de las células de los residuos frescos (carbohidratos, lípidos, proteínas, aminoácidos, azúcares y almidones) de fácil descomposición. La materia orgánica humificada es la que ha sido transformada a ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, ácidos himatomelánicos y huminas. Las sustancias húmicas no se pueden descomponer fácilmente debido a sus complejas interacciones íntimas con fases minerales del suelo, ya que químicamente son muy complejas para ser empleadas por la mayoría de los organismos (Bot & Benites, 2005).

Las sustancias húmicas se caracterizan por presentar una gran cantidad de grupos funcionales tales como carboxilos, hidroxilos, alifáticos, fenólicos, alcohólicos entre otros. Presentan un alto contenido de oxígeno (Heredia *et al.*, 2002; McCarthe, 2001), por lo que presentan una carga negativa neta, una gran diversidad de sitios reactivos con diversos tipos de enlaces débiles, que incluyen atracciones electrostáticas (enlaces iónicos y puentes de hidrógeno), interacciones hidrofóbicas, entre otras (Romic, 2012; Antoniadis & McKinley, 2003). Debido a estas características pueden atraer fuertemente a los iones metálicos cuando éstos se deprotonan, de ahí que sean las primeras capas superficiales del suelo las que retienen una gran cantidad de metales (Mayer, 1993).

Las sustancias húmicas tienen la capacidad de interactuar con iones metálicos, óxidos, hidróxidos, minerales y compuestos orgánicos, para formar complejos solubles e insolubles en agua denominados complejos organometálicos. A través de la formación de estos complejos, las sustancias húmicas pueden movilizar y transportar metales (Ashworth & Alloway, 2008).

Las huminas son la fracción no soluble en agua. Comúnmente son de color negro. Los ácidos húmicos son la fracción de humus que es soluble en agua, excepto bajo condiciones ácidas (por debajo de pH 2), pero se vuelve soluble en condiciones de pH superiores y presentan una coloración marrón oscuro a negro. Los ácidos fúlvicos son solubles en todas las condiciones de pH, su color es comúnmente amarillo claro a amarillo marrón (Chang *et al.*, 2007). Presentan en general un tamaño molecular y peso inferior que los ácidos húmicos pero con el doble de capacidad de intercambio por su alta concentración de grupos hidroxilo y carboxilo (Zafar & Sumira, 2007; Ahmed *et al.*, 2011).

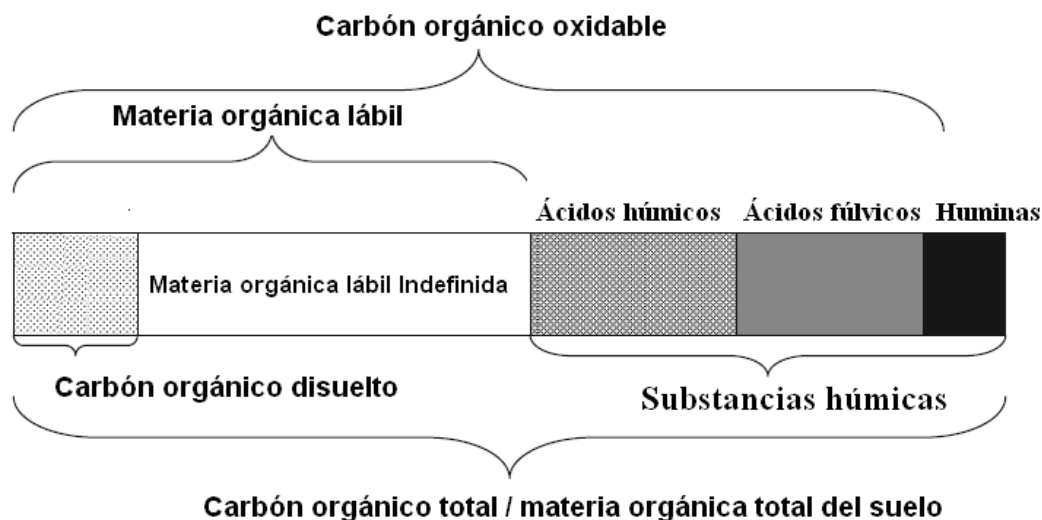


Figura 2. Esquema del fraccionamiento de la materia orgánica del suelo (Strosser 2010)

### ***Capacidad de intercambio catiónico (CIC):***

La capacidad de intercambio catiónico es un factor importante en la fertilidad del suelo, ya que determina la retención de cationes o el suministro de nutrientes esenciales para las plantas. Es consecuencia de la carga mineral que se deriva de la sustitución isomorfa, bordes rotos, y sitios de carga dependientes del pH (Brigattia *et al.*, 2006).

El valor de la capacidad de intercambio catiónico depende del contenido de partículas finas, como óxidos y arcillas. Un suelo arcilloso conserva gran cantidad de metales en comparación con un suelo arenoso (Sherene, 2010), ya que las arcillas presentan un tamaño inferior a 2  $\mu\text{m}$  lo cual les confiere un carácter coloidal, con una alta superficie específica. Las arcillas tienen la capacidad de adsorber o desorber elementos con carga positiva (cationes) en la solución del suelo y la reacción de intercambio catiónico se define como la cantidad de cationes reversiblemente adsorbidos y se expresa como unidad de masa,  $\text{cmol/kg}$  de suelo; cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico del suelo, mayor será la inmovilización de los cationes (Durán, 2010).

Las propiedades de adsorción aumentan en función a la cantidad de arcilla y pueden variar debido al tamaño de la superficie específica, y conforme aumenta el tamaño de las partículas disminuye su propiedad de adsorción (Dube *et al.*, 2001).

El origen de las cargas negativas de las arcillas se explica principalmente por la sustitución isomórfica ocasionando una carga fija o permanente a la superficie activa de las arcillas. En el caso de la zeolita, los tetraedros de  $\text{Si}^{4+}$  son desplazado por  $\text{Al}^{3+}$  y en los octaedros como la montmorillonita el  $\text{Al}^{3+}$  es sustituido por  $\text{Mg}^{2+}$ ; en ambos casos la sustitución al interior de la estructura cristalina de un elemento de una valencia mayor por otro de una valencia menor origina un déficit que resulta en una carga negativa permanente y constante (Campana *et al.*, 1995).

La capacidad de intercambio catiónico por cargas dependientes del pH de la fracción coloidal del suelo (arcillas, óxidos metálicos y materia orgánica humificada) se deben a la disociación de  $\text{H}^+$  o la protonación de los sitios no cargados de grupos funcionales. A medida que el pH aumenta, la capacidad de intercambio catiónico del suelo es generalmente mayor debido a un aumento en el número de sitios con carga negativa. Por tanto, la retención de metales aumenta. Bajo condiciones ácidas el suelo presenta sitios de unión protonados y los metales cuya carga positiva no presentaran interacciones con estos sitios por lo tanto se repelen (Mikkelsen, 2011).

Los suelos de regiones templadas generalmente se caracterizan por la presencia predominantemente de minerales con carga permanente, pero los suelos de regiones tropicales o de regiones con material de origen andesítico (alta presencia de materiales amorfos) presentan minerales con carga dependientes del pH o variable (Harter & Naidu, 2001).

### *Óxidos metálicos*

Se presentan en mayores concentraciones en sitios altamente meteorizados, con bajos contenidos de materia orgánica, con clima caluroso y alta precipitación. Estos sitios tiene las condiciones adecuadas para la ruptura de estructuras minerales primarias y secundarias originando la formación de compuestos más simples, tales como óxidos/hidróxidos, hierro y aluminio los cuales presentan una carga variable o dependiente del pH y se considera que estos elementos presentan una gran capacidad para absorber o proporcionar protones (Ferreira & Ferracciú, 2006).

Tienen alta superficie específica y reaccionan fácilmente con los iones en la solución del suelo. Se pueden presentar como fases sólidas discretas, como recubrimientos sobre arcillas y coloides orgánicos y como geles mixtos. Los óxidos de aluminio más comunes son gibbsita y boehmita, los óxidos del hierro son hematita, limonita, goetita y los del manganeso son pirolusita, todorokita, litioforita y birnessita.

La carga superficial de óxidos metálicos suele ser resultado de la ionización de los grupos funcionales, principalmente hidróxidos y oxihidróxidos, dando lugar a superficies con carga variable cuyo signo es reversible y depende de la protonización y deprotonización de los sitios (Lewis, 2005).

La carga variable de los suelos o dependiente del pH está presente en la superficie de los bordes de la estructura cristalina de las arcillas y es originada por grupos funcionales de origen orgánico (por ejemplo, carboxilo, carbonilo, fenólico) o inorgánicos como el hidroxilo o átomos de oxígeno (Sparks, 2005; Harter & Naidu, 2001). Con valores bajos de pH, la carga y por tanto la capacidad de intercambio catiónico es baja, pero aumenta al elevarse el pH (Mikkelsen, 2011).

### ***Oxidación y reducción (Potencial redox):***

La reducción y la oxidación son dos conceptos fundamentales de la química que se refieren a la capacidad de los metales a ganar electrones (reducción) o perder electrones (oxidación). El potencial redox en el suelo está dado por el potencial electroquímico o la disponibilidad de electrones dentro de un sistema (Burden & Sims, 1999; Gambrell *et al.*, 1991).

Las condiciones oxidantes están presentes en suelos poco compactos y bien drenados, que propician un medio aerobio, en tanto que las condiciones reductoras están dadas por la ausencia de oxígeno, es decir un entorno anaerobio, dado ya sea por una estructura compacta sin poros o por un consumo de oxígeno a una velocidad mayor a la que puede ser transportado a profundidad desde la superficie, así como por la saturación de los poros del suelo con agua (tabla 5) (Schaeztl & Anderson, 2005).

Tabla 5. Clasificación de suelos con base en los valores de óxido reducción (pH 7).

Clasificación	Valores Eh (mV)
oxidados	> 400
moderadamente reducidos	400 a 100
reducidos	100 a -100
muy reducidos	-100 a -300

(Stolt *et al.*, 2000)

Suelos oxidados (no inundados) presentan valores de Eh altos, la mayor parte del tiempo > 300 mV, y donde el oxígeno (O<sub>2</sub>) es el principal aceptor de electrones en los procesos de respiración del suelo (Taboada, 2003). Un suelo con un exceso de agua provoca una fuerte disminución en el potencial redox, ocasionando cambios en la solubilidad de los nutrientes. Tan pronto como el oxígeno libre se agota, la actividad microbiana predominante es anaerobia, empleando al nitrato como un aceptor de electrones alternativo a la respiración. Los óxidos de manganeso son el siguiente aceptor de electrones seguido por los óxidos de hierro, resultando en una aumento en la cantidad de hierro soluble (Fe<sup>2+</sup>) y manganeso (Mn<sup>2+</sup>), continuando con la cadena de aceptores de electrones el sulfato, se transforma a sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) que en solución acuosa es considerado como ácido sulfhídrico

(acidificando el suelo). Finalmente se da la formación de metano a partir de la reducción de dióxido de carbono y ciertos ácidos orgánicos (tabla 6) (Shabala, 2010; Szögi *et al.*, 2004).

Tabla 6. Valores de potenciales de oxidación-reducción (Eh) necesarios para reducir formas oxidadas de varios aceptores de electrones alternativos en suelos.

Forma oxidada	Eh (mV)	Forma reducida	Estado de oxidación	Estado de aireación
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	>+300	Agua (H <sub>2</sub> O)	Oxidado	Aeróbico
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	+300 a +100	Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	Moderadamente reducido	Anaeróbico
Manganeso (Mn <sup>4+</sup> )	+300 a +100	Manganeso (Mn <sup>2+</sup> )	Moderadamente reducido	Anaeróbico
Hierro (Fe <sup>3+</sup> )	+100 a -100	Hierro (Fe <sup>2+</sup> )	Reducido	Anaeróbico
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	< -100	Sulfuro (S <sup>2-</sup> )	Reducido	Anaeróbico
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	< -100	Metano (CH <sub>4</sub> )	Altamente reducido	Anaeróbico

Szögi *et al.*, 2004

## ***2.2 Mecanismos de evasión y tolerancia de las plantas frente a la toxicidad de los metales***

En relación a las funciones que cumplen los metales en las plantas, éstos se pueden dividir en dos grupos:

- Metales sin función biológica conocida como el Cd, Hg y Pb entre otros, cuya presencia en determinadas cantidades puede provocar daños o alteraciones en el funcionamiento de los organismos, son altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los seres vivos.
- Metales esenciales son aquellos que cumplen una función dentro de los organismos y que se requieren en pequeñas cantidades (micronutrientes) para que los seres vivos desarrollen su ciclo vital, pero pueden llegar a ser tóxicos pasado un cierto umbral, entre ellos se encuentran: Cu, Zn, Fe, Mn, Mo, y Co, entre otros.

Los micronutrientes son esenciales para la biosíntesis de ácidos nucleicos, clorofila, hidratos de carbono y lípidos, entre otros. Un suministro adecuado de micronutrientes es esencial para la integridad de las membranas así como para la resistencia al estrés (Rengel, 2004).

A través de la evapotranspiración las plantas tienen la capacidad de movilizar nutrientes de la raíces hasta las hojas (Tanner & Beevers, 2001) incorporando así elementos esenciales, pero también elementos sin ninguna función biológica (Carginale *et al.*, 2004).

La acumulación de niveles elevados de iones metálicos en plantas causa fitotoxicidad, por lo que han desarrollado estrategias para protegerse contra este tipo de estrés. La tolerancia a los metales puede ser a partir de dos estrategias básicas: la **exclusión del metal y la desintoxicación**. La exclusión está dada en función de una serie de mecanismos moleculares y fisiológicos que previenen la captación del metal en las raíces evitando el desplazamiento al interior de la planta, precipitándolos en la rizosfera (Lasat, 2002; Tangahu *et al.*, 2011).

Otra de las estrategias es mediante la secreción de compuestos orgánicos denominados muco-polisacáridos, son considerados agentes quelantes que pueden evitar la entrada de los metales a las raíces de forma tal que los metales presentes en la rizosfera son quelados y precipitados en el suelo (Ciéslínski *et al.*, 1998).

Por otra parte las plantas poseen una gama de posibles mecanismos celulares que pueden estar implicados en la desintoxicación de metales y por lo tanto la tolerancia al estrés del metal. Dentro de estas estrategias se da la inmovilización en pared celular, la reducción de la absorción o el bombeo de flujo de salida de los metales en la membrana plasmática, la quelación de metales en el citosol por péptidos tales como fitoquelatinas y la compartimentación de los metales en la vacuola por mencionar algunas (Hall, 2002).

### ***2.3 Mecanismos celulares de absorción de metales por las plantas***

#### ***Absorción de metales por las raíces***

Los metales del suelo que están solubles son absorbidos por las raíces de dos formas: activa (vía simplasto) o pasiva (vía apoplasto). Cuando la absorción se da vía apoplasto, los iones de metal o los complejos metálicos (metal+quelato) penetran en la raíz a través de los espacios intercelulares. En tanto que vía simplasto es un proceso dependiente de energía (ATP), ya que está mediado por acarreadores de electrones de membranas. Una vez en la endodermis, toda el agua y los metales se ven forzados a ingresar de forma intracelular por la banda de Caspari llegando a los haces vasculares; de ahí el agua y los solutos pueden ser distribuidos al resto de la planta (figura 3) (Vander *et al.*, 2007).

#### ***Transporte de los metales de la raíz a las hojas***

Para poder traslocar los metales de la raíz hacia las hojas, los metales deben pasar al xilema y para ello tienen que cruzar la banda de Caspari localizada en la endodermis radicular, la cual es una barrera impermeable al agua que bloquea el flujo apoplástico de metales a partir de la corteza de la raíz a los vasos vasculares o xilema. Por lo tanto, para atravesar esta barrera y alcanzar el xilema, los metales deben moverse a través del simplasto, por medio de estos procesos dependientes de energía es que elementos no esenciales como el Cd compiten por el portador transmembrana utilizado por elementos esenciales como el Cu/Zn; lo que se considera es una limitante en la translocación de metales hacia el xilema (Mahmood, 2010).

## Sistemas de transporte

Se lleva a cabo principalmente por tres tipos de sistemas que pueden mediar el transporte de iones metálicos a través de la membrana plasmática.

**Canales transmembranales:** esta clase de proteínas se encuentran por doquier en las membranas. Los sistemas de transporte de este tipo catalizan la difusión facilitada (por un proceso independiente de la energía) por el paso a través de un poro acuoso o canal sin evidencia de un mecanismo mediado por portador.

**Acarreadores:** utilizan el potencial químico eléctrico de la membrana “Uniportador” un solo ion es transportado por difusión facilitada; “Sinportador” dos o más iones son transportados juntos en la misma dirección; Antiportador dos o más iones son transportados en direcciones opuestas (figura 3).

**Bombas:** son sistemas de transporte activos y permiten la acumulación de iones en contra de un gradiente químico, utilizan la energía derivada directamente de la hidrólisis de ATP (Saier, 2002).

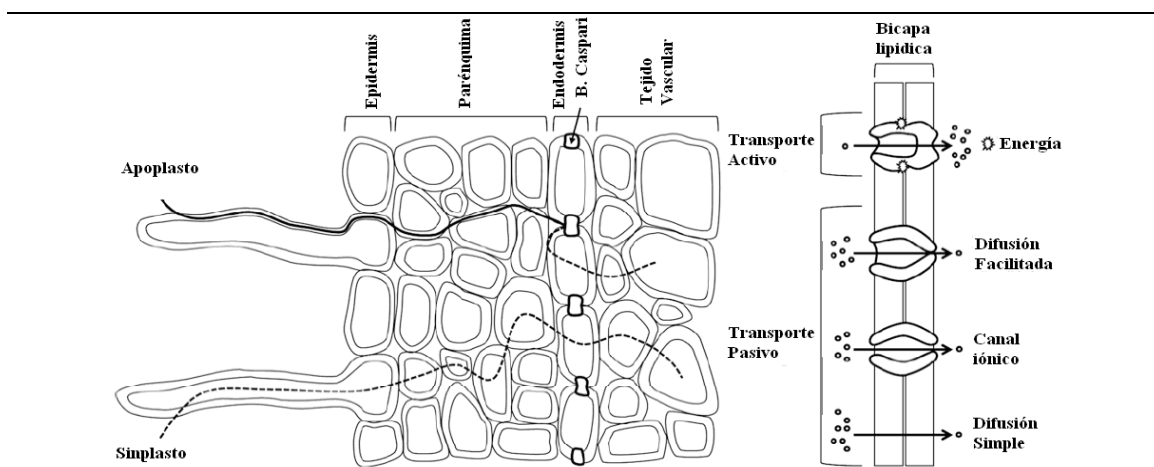


Figura 3 Esquema de corte transversal de la raíz muestra las vías de absorción de metales y esquema general del sistema de transporte transmembrana ( Trakal *et al.*, 2015)

## Transporte y confinamiento

Una vez que los metales son captados por las plantas, se confinan en compartimentos celulares como: vacuolas, pared celular, células epidérmicas y tricomas tanto en la raíz como en las hojas para prevenir el desplazamiento y toxicidad en sitios con alta actividad metabólica de la planta (Bondada & Qiyang, 2003).

La carga eléctrica evita que los iones del metal se difundan libremente a través de las membranas celulares lipofílicas en el citosol. Por lo tanto, el transporte del ion en las células se da a través de los transportadores de membrana y se requiere de un transportador para la exclusión de un ion metálico (Lasat, 2002).

Existe una gran cantidad de transportadores agrupados en diferentes familias, implicados en el flujo del metal a través de la membrana plasmática celular (figura 4), entre los que destacan las Nramp, implicados en el transporte de iones metálicos divalentes. Este transportador puede ser localizado en la membrana vacuolar; las Facilitadoras de Difusión de Cationes (**CDF** por sus siglas en inglés), asociadas a metales como el Zn, Co y Cd, y se pueden localizar en la membrana plasmática o vacuolar, así como en las membranas intracelulares de tallos y raíces. Los transportadores pertenecientes a la familia de las **IRT1** están implicadas en el transporte de Fe pero también puede transportar metales divalentes como el Mg, Zn y Cd (Clements, 2006; Sunitha *et al.*, 2014).

La familia de **YSL** sirven para mediar la captación de metales como el Fe precipitándolo mediante complejos sideróforos, que son exudados a través de la raíz, los cuales funcionan como agentes quelantes y tienen una alta afinidad para el Fe y otros sustratos como el Zn, el Mn, el Ni, y el Cu y, por último, una súper familia de transportadores que bombea una gran gama de cationes a través de la membrana celular, incluyen la bomba de protones ( $H^+$ -ATPasa) así como la de  $Na^+/K^+$  y la de  $Ca^{2+}$  (Colangelo *et al.*, 2006; Mudgal *et al.*, 2010).

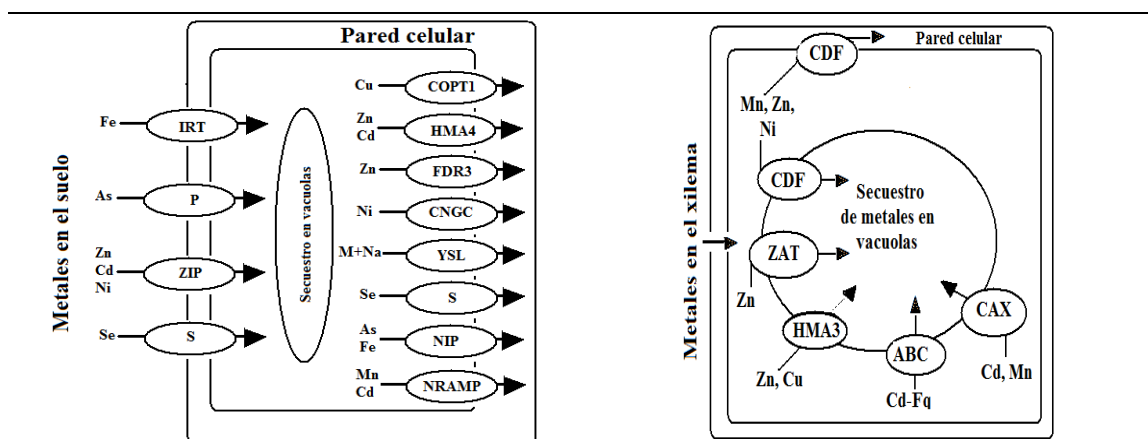


Figura 4 Representación esquemática de la absorción y el transporte de los metales en las plantas a través de transportadores metálicos transmembrana en raíz (Izq.) y en hoja (Der.) (Hossain *et al.*, 2012)

Una consecuencia común de la toxicidad de metales pesados es la acumulación excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS) y metilglioxal (MG), los cuales pueden causar la peroxidación de lípidos, la oxidación de la proteína, la inactivación de las enzimas y el daño del ADN en las células vegetales (Mukti, 2014). Las plantas presentan dos tipos de estrategias en función a los antioxidantes, una respuesta enzimática y una no enzimática. Los componentes enzimáticos son básicamente cuatro: la enzima superóxido dismutasa (SOD), la ascorbato peroxidada (APX), la enzima glutatión peroxidasa (GSH-Px) y la enzima catalasa (CAT). La enzima SOD destruye a los radicales libres superóxido.



Su actividad se relaciona con las células aeróbicas (que requieren oxígeno); la APX es la principal enzima del ciclo ascorbato /glutación y presenta gran afinidad por el ácido ascórbico y se localiza principalmente en cloroplastos y citosol; la enzima GSH-Px, se relaciona principalmente con las membranas celulares; finalmente, la enzima CAT destruye al peróxido de hidrógeno formado en los peroxisomas (Xue 2000, Ríos 2008, Parvaiz & Prasad 2011), algunos antioxidantes no enzimáticos serían: el ácido ascórbico (ASA), glutación (GSH) y tocoferol (Sytar *et al.*, 2013).

### ***Importancia y síntesis de fitoquelatinas y metalotioneínas***

El incrementando la actividad enzimática de antioxidantes como SOD, APX, CAT, así como la actividad del ascorbato y el glutación están relacionados directamente con las síntesis y producción de fitoquelatinas (Piotrowska-Niczyporuka *et al.*, 2012; Seth *et al.*, 2012).

Fitoquelatina sintasa (FQ's) es una enzima que lleva a cabo la conversión de glutación a las FQ, y es activado por diferentes elementos potencialmente tóxicos. Cisteína sintasa cataliza el último paso en la asimilación de sulfato en el aminoácido. Las metalotioneínas (MT's) son proteínas de bajo peso molecular, ricas en cisteína. Las MTs protegen los cloroplastos de una posible degradación ante la exposición de metales, mediante la reducción de la presencia de especies reactivas del oxígeno; además se sabe que los metales permanecen unidos a las MTs en el citoplasma y no están secuestrados en la vacuola (Mudgal *et al.*, 2010).

### ***Exudados radiculares***

En la zona radicular se generan una gran cantidad de compuestos de bajo peso molecular los cuales se consideran sirven como mediadores para la adquisición de nutrimentos ya que tienen la capacidad de movilizar (mediante ácidos orgánicos) y complejar iones metálicos de forma selectiva, mediante carbohidratos como polialginatos, péptidoglucanos, polisacáridos, glicoproteínas, fucanoides, compuestos heterocíclicos, flavonoides, en los cuales los centros atrayentes de cationes son los grupos funcionales amino, hidroxilo, carboxilo, fosfato, sulfhidrilos, etc. Los exudados radiculares influyen en la solubilidad de elementos esenciales y no esenciales, mediante la acidificación y la quelación (Navarro *et al.*, 2006; Qiana *et al.*, 1996)

## ***2.4 Absorción de metales en lechuga***

Actualmente se sabe que los suelos urbanos están enriquecidos con metales como Pb, Cd y Zn, entre otros; si se usan estos suelos para la agricultura, estos metales podrían transferirse a los cultivos (Sterrett *et al.*, 1996). Tal es el caso de los cultivos de hoja comestible, como la lechuga, en los que los contaminantes pueden representar un riesgo potencial (McBride 2013), ya que se ha reportado que éstas presentan una alta capacidad de acumulación de metales (Smical *et al.*, 2008), principalmente debido a la alta tasa de evapotranspiración

(Liao *et al.*, 2006). Se ha reportado que la absorción de metales no sólo se puede dar por transferencia suelo-raíz, sino que también puede ocurrir vía foliar a través de la depositación de los contaminantes presentes en el aire (Uzu *et al.*, 2010), así como polvo o salpicaduras de suelo sobre las hojas; de ese modo se pueden alcanzar concentraciones sustancialmente elevadas en los vegetales por lo que el manejo del cultivo constituye una parte fundamental para evitar el riesgo de contaminación (McBride, 2013).

### 3. ANTECEDENTES DE XOCHIMILCO

En el fondo de la cuenca, donde ahora se asienta la Ciudad de México, se encontraba un sistema de lagos que cubría una superficie de 1500 km<sup>2</sup>. Cinco eran los principales lagos: Texcoco, Zumpango, Chalco, Xaltocan y Xochimilco de los que actualmente solo quedan algunos remanentes (Izazola, 2001).

Dada la escasez de tierra firme en el sistema de lagos se construyeron chinampas entre los años 900 y 902 A.C. por los indígenas nahuatlacas (Xochimilcas, Chalcas y Tlahuicas). Formaban islotes artificiales por amontonamiento de plantas acuáticas que cubrían con lodo extraído del fondo del lago, el cual era agregado de forma constante, así como abonos orgánicos. Sus orillas se protegían con entretejidos de diversos materiales vegetales que anclaban con estacas de ahuejote (*Salix bonplandiana*) para evitar su erosión (figura 5) (Outerbridge, 1987). Inicialmente se utilizaron para construir viviendas y después se destinaron a la agricultura, representando uno de los sistemas más productivos jamás logrados. Se calcula que a principios del siglo XVI había 100 000 chinampas con tres a diez ocupantes en cada una, que daban sustento a una parte importante de la población local (Izazola, 2001).

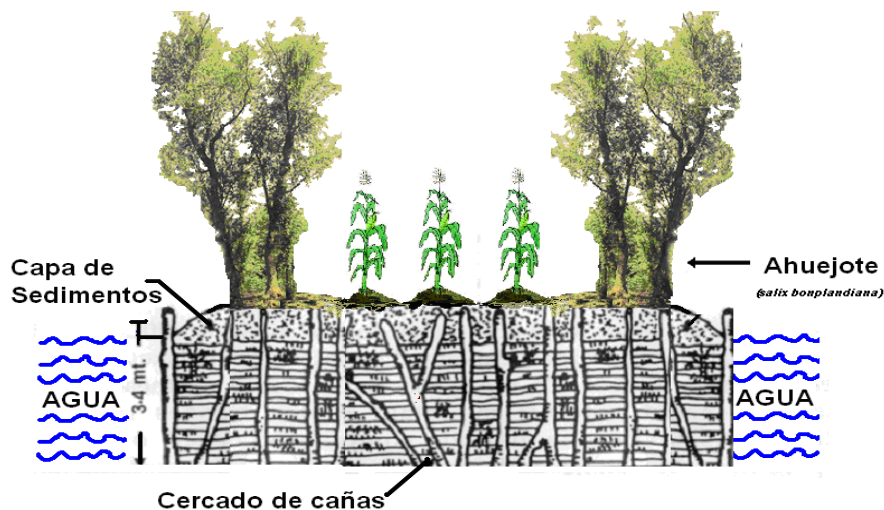


Figura 5. Esquema de una Chinampa (Modificado de Outerbridge, 1987)

Al formarse las chinampas dieron origen a un sistema de canales cuya longitud se estima aproximadamente en 203 km conectados entre sí; entre los que destacan: Cuemanco, Canal Nacional, Chalco, el Bordo, Apatlaco, Caltongo, Japón, Tliculli, Ampampilco, la Noria, Amelalco y Texhuilo (Aranda & López, 2004).

La UNESCO declaró a la zona chinampera de Xochimilco Patrimonio de la Humanidad en 1987 (Alcántara, 2005), ya que aún quedan los vestigios de lo que fuera un agroecosistema de origen prehispánico denominado chinampa, construido artificialmente en zonas del lago de Xochimilco-Chalco (Quiñonez, 2005). El nombre de chinampa significa “cercado de cañas” y deriva del náhuatl *chinamitl* “cerca de cañas” y la preposición *pan* “en” (Alcántara, 2001). Actualmente la denominación de ser patrimonio de la humanidad está en riesgo, por una modificación acelerada que ha sufrido el sistema por el aumento de la urbanización en la zona y el cambio de uso de suelo, que genera la desaparición de canales y la degradación e integridad de la zona chinampera (Alcántara, 2005).

### ***3.1 Zona chinampera de Xochimilco***

#### **Localización:**

La zona chinampera se localiza en la delegación Xochimilco siendo las coordenadas geográficas al norte 19° 19', al sur 19° 09' de latitud norte; al este 98° 58' y al oeste 99° 10' de longitud oeste. La altitud media de esta demarcación es de 2,240 m.s.n.m. La delegación colinda al norte con las delegaciones Tlalpan, Coyoacán, Iztapalapa y Tláhuac; al este con las de Tláhuac y Milpa Alta; al sur con las delegaciones Milpa Alta y Tlalpan, y, al oeste con la delegación Tlalpan sur de la Ciudad de México (PDDU Xochimilco, 2005).

#### **Clima:**

Xochimilco es templado subhúmedo con lluvias en verano y parte del otoño; la precipitación media anual está entre 600 y 800 mm, la temperatura media anual es de 16°C, los meses más fríos son de noviembre a febrero (Espinoza-García & Mazari-Hiriart, 2006).

#### **Geología y geomorfología:**

El sistema lacustre “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco” se ubica fisiográficamente en la provincia del Eje Neovolcánico, Subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac, en el extremo sur de la Cuenca de México. Se originó al final del período terciario superior y principios del cuaternario; durante esta fase la parte sur del Valle fue obstruida por la formación de la Sierra del Chichinautzin, surgiendo la cuenca endorreica de México, y a partir de ello, el depósito de materiales de origen volcánico, aluvial y orgánico (Aranda & López, 2004).

#### **Suelos:**

Los suelos de esta región son de origen antropogénico y se les clasifica de acuerdo con la World Reference Base (WRB, 2006) como **Antrosoles**, que se caracterizan por presentar un color relativamente uniforme negro y gris oscuro en todo el perfil, una distribución vertical irregular de arcillas y de materia orgánica, que muchas veces aumenta con la profundidad del suelo y un alto porcentaje de carbono orgánico.

Durante la estación seca se presenta una concentración variable de sales en los horizontes superficiales en la mayoría de los suelos (Ramos Bello *et al.*, 2011).

### ***3.2 Problemática de Xochimilco***

Xochimilco era un espacio rural que ha ido cambiando con el impacto de la expansión metropolitana de la ciudad de México; poblaciones que hasta hace dos décadas permanecían como asentamientos humanos separados de la urbe, con una clara delimitación y un carácter rural, hoy se han integrado a lo que se denomina Zona Metropolitana de la Ciudad de México. En los años setenta se produjo la expansión de las zonas residenciales hacia el sur de la ciudad y la apertura de importantes vías de comunicación dio como resultado la integración de Xochimilco a la zona urbana. Este proceso originó un incremento del valor del suelo para vivienda, por lo que la compra-venta irregular de tierras y la acelerada construcción afectaron a los suelos agrícolas que eran empleados para la producción de hortalizas y flores. En los años sesenta se tenía un registro de 5,690 hectáreas (Torres *et al.*, 1989), pero esta superficie se ha reducido sensiblemente ya que en 1987, en el momento en que fue inscrito en la lista del Patrimonio Mundial de la Humanidad, el área de canales y chinampas dentro de la delegación Xochimilco contaba con una extensión de alrededor de 2,200 ha, que actualmente se han reducido a 1,800 ha, sin tomar en cuenta las 49 hectáreas que ocupan los asentamientos humanos irregulares estimados en el 2009 (Ruiz, 2012).

Previo a la apertura de vías de comunicación a principios del siglo XX, entre 1905 y 1908, se construyó un acueducto para conducir el agua procedente de los manantiales de la Noria en Xochimilco hacia los tanques del Molino del Rey a 26 km de distancia. Esta obra sustituyó el abasto de agua a la ciudad proveniente de los manantiales de Chapultepec y del Desierto de los Leones y de 1912 a 1940 el agua para abastecer a la ciudad provenía principalmente de los manantiales de Xochimilco. Entre 1940 y 1944 se inició también la explotación intensiva del acuífero en la zona, con la perforación de 75 pozos profundos de hasta 200 metros (Izazola, 2001; Terrones, 2006). Esta extracción de agua de forma desmedida ocasionó que el nivel del agua en los canales de las chinampas sufriera un considerable descenso y en 1957 prácticamente estuvieron por secarse, por lo que desde entonces se comenzaron a reabastecer con agua tratada (Alatríste, 2005; Neira, 2005).

En 1971 entró en operación la planta de tratamiento de aguas residuales Cerro de la Estrella y abastece los canales con un caudal de 800-1,000 L/s (Ángeles-Serrano *et al.*, 2008). Además también hay un gran número de descargas clandestinas de agua doméstica que se han incrementado con la invasión urbana, ya que la red de canales se utiliza como un sistema de drenaje, siendo una de las principales fuentes de contaminación (López-López *et al.* 2010; Ezcurra, 1996).

Estas entradas de agua al sistema aportan varios contaminantes que reducen la calidad de agua en los canales (Chanduvi 1993, Pérez *et al.*, 2008). En el agua de los canales se han reportado altas concentraciones de sales, compuestos tóxicos (Zambrano *et al.*, 2009) y de bacterias patógenas (Juárez-Figueroa *et al.*, 2003, Solís *et al.*, 2003). También se ha documentado la presencia de plaguicidas organoclorados y fosforados en sedimentos (Alcántara, 2013) y metales en lirio acuático (Carrión *et al.*, 2012). Otros compuestos que pueden estar presentes son hidrocarburos aromáticos policíclicos, hormonas y antibióticos, dioxinas y furanos, que se han reportado en aguas residuales de la Ciudad de México

(Dalkmann *et al.*, 2012; Gharbi *et al.*, 2010). Actualmente los canales de Xochimilco presentan un ambiente hipereutrófico, resultado de la presión antropogénica que se ejerce sobre los cuerpos de agua, ya que los nutrientes y sólidos suspendidos rebasan los límites máximos permitidos en la NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (Flores, 2009).

De acuerdo con Ramos Bello *et al.*, (2011) la concentración de sales en el agua es uno de los principales problemas, ya que la concentración del sodio en los canales alcanza niveles de 0,5 g/L, lo que daña las plantas y causa la salinización del suelo. En la zona lacustre y chinampera de Tláhuac y Xochimilco ya se tienen reportes de desertificación, debido a la mala calidad del agua que proviene de las diversas plantas de tratamiento, las cuales no cuentan en sus procesos con la capacidad de eliminar las sales, por lo que gradualmente se está dando una salinización y sodificación de estos suelos (Ikkonen *et al.*, 2012; González-López *et al.*, 2009).

Hace algunos años se consideraba que el uso de aguas residuales tenía como beneficio un aporte de elementos esenciales a los cultivos y los suelos agrícolas; sin embargo, también hay reportes que el contenido de contaminantes en el suelo y agua pueden dar lugar a altas concentraciones en los vegetales y reducir su calidad (Aweng *et al.*, 2011), por lo que es necesario evaluar la calidad de suelos que se riegan con aguas residuales y los factores de transferencia de contaminantes a las plantas, sobre todo las comestibles.

Debido a la expansión acelerada de la ciudad y sus necesidades de agua y tierra así como el deterioro ecológico, no se preservó el uso del suelo para la actividad agrícola y las chinampas han perdido mucha de su capacidad productiva tradicional, lo que ha resultado en el abandono de la producción de maíz y de hortalizas que se manifiesta en una gradual aparición de invernaderos dedicados a la producción de plantas ornamentales (Neira, 2005).

Los suelos chinamperos presentan diferentes grados de alteración ocasionados por múltiples factores, entre los que se destacan: la proximidad al área urbana que ocasiona la pérdida de tierras agrícolas y que año con año se reduce la superficie de cultivo y con ello la producción agrícola (tabla 7), por lo que estarían entrando en un proceso de desaparición (Ezcurra, 1996; De la Rosa, 2006).

Tabla 7. Reducción de la superficie cultivada en la zona chinampera (ha.)

Década	Superficie cultivada (ha)
1950	1,077
1960	1,028
1970	980
1980	935
1990	1,071
2000	800

(De la Rosa, 2006)

En muchos casos, los chinamperos utilizan agroquímicos en sustitución de las técnicas tradicionales para poder aumentar el rendimiento de los cultivos, teniendo como consecuencia la contaminación por plaguicidas y fertilizantes (Ángeles-Serrano *et al.*, 2008); además de un mal manejo, debido al riego con aguas contaminadas y residuales, la aplicación excesiva de abonos orgánicos (estiércol y composta), y de diversos materiales como arena, grava, cieno, sales minerales, desechos de alimentos y basura (Reyes & García, 2004).

Los suelos de las chinampas no han recibido mucha atención en la literatura científica, aunque hay gran cantidad de reportes en tesis a varios niveles o resúmenes de conferencias los cuales no se encuentran de forma disponible para la comunidad científica, además de que son pocos los trabajos publicados en revistas científicas (Ramos *et al.*, 2011).

Pese a esto cabe destacar algunos trabajos de tesis realizados en diversos puntos de la zona chinampera de Xochimilco para conocer cuál es el grado de contaminación que actualmente guarda esta zona. A continuación se presenta un resumen de algunos trabajos realizados en la zona sobre metales en agua de los canales, suelo y vegetales (tablas 8 a 10).

Tabla 8. Concentración de algunos elementos potencialmente tóxicos (mg/L) medidos en el agua de uno de los canales de la zona de Xochimilco.

Elemento	As	Cr	Ni	Pb	Zn	Fe
Concentración	0.0071	0.0056	0.0087	0.0042	0.1	0.3

(Sánchez & Hernández, 2010)

Tabla 9. Concentración de metales (mg/kg) en suelos y hojas de lechuga bajo diferentes condiciones de iluminación solar.

	Tratamiento	Mn	Cu	Cr	Ni	Zn	As	Cd	Pb
Suelo	Con malla sombra	324.98	22.03	45.00	21.89	83.71	5.47	0.29	25.29
	Sin malla sombra	293.25	17.60	45.43	22.38	52.74	4.98	0.29	20.74
Hojas de lechuga	Con malla sombra	20.90	3.69	2.31	2.03	3.01	0.13	0.16	0.03
	Sin malla sombra	67.13	6.09	1.73	1.97	13.61	0.41	0.15	0.88

(Murguía, 2008; Ponce de León, 2010).

Tabla 10. Concentración de metales (mg/kg) en suelos y algunas especies vegetales en la zona de Xochimilco.

		Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Suelo	0-10 cm	0.24	0.48	0.85	37.88	7.77	0.58	0.67	3.21
	10-30 cm	0.24	0.59	0.91	38.36	7.70	0.23	0.53	2.91
Acelga (hojas)		0.62	0.016	0.31	0.77	0.31	0.77	2.33	0.33
Maíz (mazorca)		0.95	0.016	0.25	1.33	0.43	0.93	3.47	0.73

(Vega, 2010)

Por lo que se puede resumir de los trabajos anteriores es que los cultivos presentan una transferencia de metales del suelo a la planta y que dependiendo de la especie es el grado de acumulación. Los reportes en suelo de la concentración total no son altos, pero de forma constante estos suelos están recibiendo un aporte por parte del agua de riego de los canales y la aplicación de fertilizantes, por lo que en un futuro este sitio podría ser una fuente de contaminación ya que no se sabe aún cuál es la capacidad de retención del suelo a los metales.

#### **4. JUSTIFICACIÓN**

En suelos agrícolas se han incrementado los niveles de metales por la aplicación de fertilizantes, el uso de aguas residuales en el riego, la aplicación de abonos y pesticidas y la depositación atmosférica, lo que representa un aporte significativo de metales. Lo anterior tiene como consecuencia un riesgo de bioacumulación en los cultivos de importancia comercial y de consumo humano que afectan la calidad e inocuidad de los alimentos (Omoloye, 2009; Wuana & Okieimen, 2011).

La contaminación por metales en suelos de cultivos agrícolas ocasiona bajos rendimientos y mala calidad de los cultivos (Felix-Henningsen *et al.*, 2010). Aunado a esto, se considera que el consumo de hortalizas puede ser una vía de exposición importante de los contaminantes presentes en el suelo. Actualmente esto es una preocupación global, por lo que organismos mundiales como la FAO/WHO, gobiernos de América Latina, la Unión Europea y otras comunidades, han estado implementado normas para poder obtener alimentos de calidad, ya que la agricultura urbana juega un papel importante en el marco de la seguridad alimentaria (Brown & Jameton, 2000).

En América Latina existe un manifiesto conocido como la declaración de Quito que realza el compromiso de algunos países, entre ellos México para una agricultura urbana en las ciudades de siglo XXI en donde los gobiernos deben incluir a la agricultura urbana en sus programas para aliviar la pobreza, seguridad alimentaria, la promoción del desarrollo local y mejorar el medio ambiente y la salud pública (Declaration of Quito, 2000).

La zona lacustre de Xochimilco, de gran importancia cultural, ecológica y económica, ha sido declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad. Sin embargo, las presiones antrópicas han impactado negativamente la flora y la fauna nativa. Las chinampas son el punto central de esta zona y actualmente están en riesgo por distintos factores, como la contaminación del agua, el exceso de salinidad en ella y la pérdida de humedad en el suelo; aquí es donde radica el gran problema para las chinampas ya que dependen totalmente del agua, la cual está contaminada, esto hace que los vegetales ya no sean aptos para el consumo humano (Terrones, 2006).

## 5. OBJETIVO

- Determinar las principales características físicas y químicas del suelo que influyen en la movilidad de los metales y evaluar su incorporación en lechugas de la zona de San Gregorio Atlapulco Xochimilco durante dos ciclos agrícolas contrastantes (secas y lluvias).

### *Objetivos Particulares*

- Conocer las principales características físicas y químicas del suelo que influyen en la movilidad de los metales (Cd, Pb, Cr, Cu, Zn, Mn y Fe), así como determinar su concentración total.
- Conocer a que fracción del suelo se encuentran asociados los metales a analizar y determinar el grado de biodisponibilidad.
- Determinar el contenido de metales en raíz y hojas de lechuga, en tres fases vegetativas (plántula, juvenil y adulto) durante dos ciclos agrícolas (en lluvias y secas).
- Conocer la calidad de las lechugas en etapa de consumo, comparando el contenido de metales con normativas internacionales (*Codex alimentarius*. FAO/WHO).



## 6. HIPÓTESIS

### ***SUELO***

Se espera que debido a las características que presenta la zona de Xochimilco: pH ligeramente alcalino, un pE variable (dependiente de la intensidad del riego y la influencia del manto freático) y un alto contenido de materia orgánica, la mayoría de los iones metálicos presentes en el suelo se encuentren poco disponibles para las plantas. Sin embargo cambios en procesos temporales (potencial redox (pE),  $C_{org}$  disuelto, concentración de sales en la solución), puede aumentar la disponibilidad de los metales y con ello también la cantidad de metales que son absorbidos por las plantas.

### ***Metales sujetos a óxido reducción (Mn, Fe y Cr)***

Mediante el monitoreo del potencial redox se puede determinar teóricamente cual es la forma química y grado de movilidad que probablemente presentan el Mn, Fe y Cr.

- Manganeseo ( $Mn^{2+}$ ) en condiciones de pH neutro y con valores de Eh que oscilan entre el 0.2 y el 0.6 V, se espera que esté en formas solubles y con ello disponibles para las plantas.
- Hierro se requieren de condiciones más ácidas y más reductoras (-0.1 a -0.6 V), para que esté disponible como  $Fe^{2+}$ , por lo que se espera que por las condiciones del suelo de Xochimilco esto no ocurra.
- Cromo, se espera se encuentre poco soluble ya que para ello requiere de valores de pH o muy ácidos o muy básicos, condiciones que no se tienen en los suelos de Xochimilco.

### ***Metales que presentan afinidad por materia orgánica (Cu, Pb y Zn)***

La gran cantidad de materia orgánica presente en el sitio de estudio puede ser un factor determinante para la retención del Cu, Pb y Zn, por lo que se espera encontrar estos elementos fuertemente asociados a la materia orgánica y poco disponibles; sin embargo, el carbono orgánico disuelto presente en la solución del suelo y exudados (quelatos) que la planta puede estar excretando en torno a la rizosfera pueden movilizar algunos metales favoreciendo su absorción.

### ***Los asociados a cloruros (Cd)***

Dado que en el sitio presenta un aporte de sales disueltas en el agua, es factible encontrar cloro en su forma aniónica, la cual puede interactuar con diversos metales, entre ellos el cadmio, para formar complejos con aniones como el  $Cl^-$  dando como resultado cloruro de cadmio ( $CdCl_2$ ) el cual resulta ser altamente móvil y tóxico.

## ***PLANTA***

La actividad fisiológica en cada una de las etapas del ciclo de vida de las plantas determina el grado de absorción de metales, ya que una planta joven presenta mayor capacidad de absorción de los iones con respecto a una planta adulta, pero una planta adulta tiene una tasa de evapotranspiración más alta que una joven, por lo que se espera encontrar diferencias en el grado de acumulación de metales en las distintas etapas del ciclo de vida y también entre secas y lluvias.

## 7. MÉTODOS

En la localidad de San Gregorio Atlapulco, Xochimilco se seleccionó una chinampa en la cual todo el año se cultiva lechuga (*Lactuca sativa L.*), tiene un canal principal al norte y cuenta con una superficie de 2074m<sup>2</sup> con 122m de largo por 17m de ancho; el lugar se encuentra subdividido en cuatro partes y en ocasiones el terreno se siembra completamente y se hace una sola cosecha o se siembra por partes a diferentes tiempos, de forma que se pueda estar cosechando continuamente. La mitad de la parcela está cubierta con una malla sombra, además presenta tres tomas de agua que se conectan directamente al canal principal mediante tubos de plástico de 4” de diámetro; la extracción de agua para el riego se hace con una motobomba de 5.5 hp. Se realizó una visita de reconocimiento a un tiempo cero (11/2012), antes de la siembra, esto con el fin de determinar la homogeneidad de la parcela y establecer los sitios de toma de muestras e instalación de electrodos para el monitoreo del potencial redox *in situ*. La figura 6 muestra un esquema general de las actividades realizadas en este trabajo.

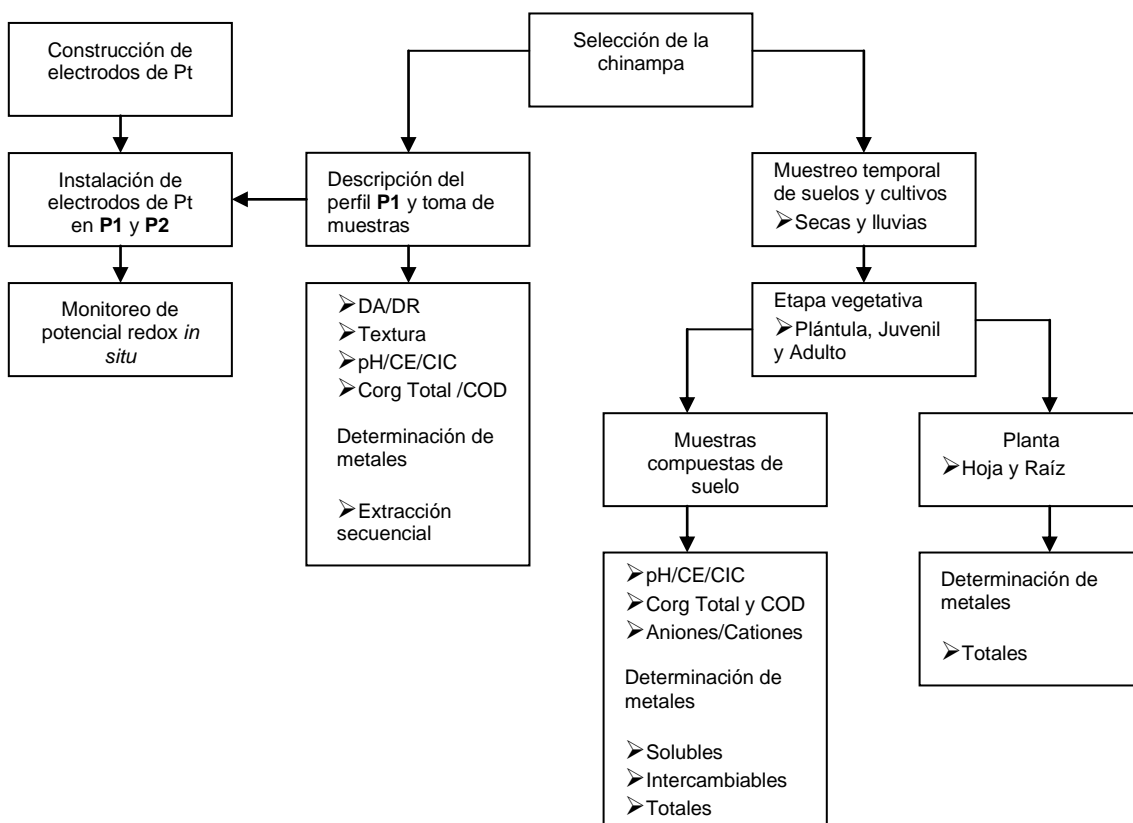


Figura 6. Diagrama de actividades realizadas en este trabajo.

Abreviaturas: DA densidad aparente, DR densidad real, pH potencial de hidrogeno, CE conductividad eléctrica, CIC capacidad de intercambio catiónico, Corg. Carbono orgánico COD, carbono orgánico disuelto, P1 punto al centro de la parcela y P2 punto cercano al canal

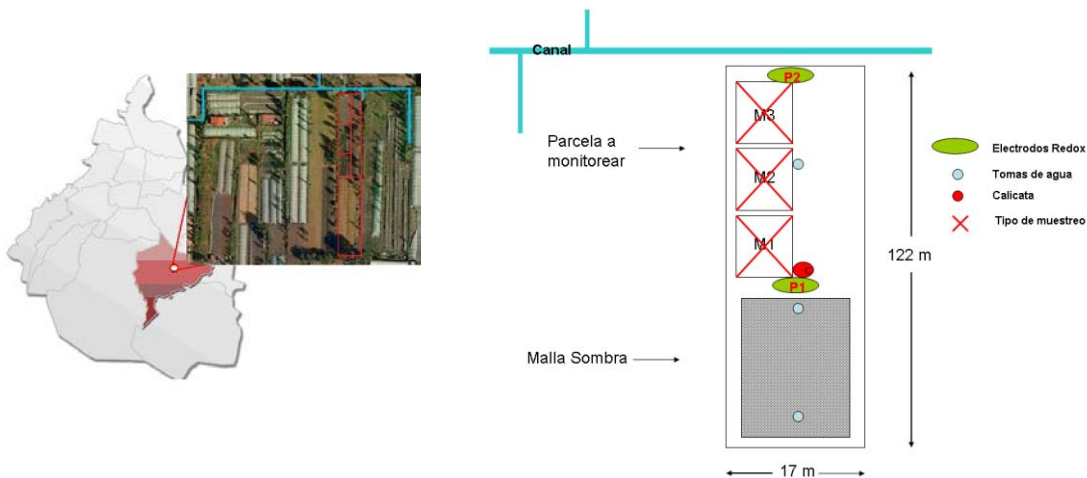


Figura 7 Ubicación de la chinampa en la Delegación Xochimilco y esquema de localización de los sitios de muestreo y toma de datos: perfil (C) sitios donde se instalaron los electrodos de platino (P1 y P2), y la subdivisión que se hizo de la parcela para tomar muestras compuestas de suelo superficial y lechugas (M1, M2, M3).

Se describió solamente una calicata, la cual se encontraba en el centro de la parcela “P1” (figura 7) para identificar, describir y tomar muestras de los horizontes, cabe mencionar que este fue el **único punto** al que se estimó la textura al tacto, se determinó el color utilizando tablas estándar Munsell, las condiciones de humedad, pedregosidad, estabilidad de agregados, porosidad y se tomó el pH, de acuerdo a la metodología propuesta por Siebe *et al.*, 1996.

### 7.1 Construcción de electrodos de platino

Para construir los electrodos se siguieron las indicaciones descritas por Vepraskas (2002). Se utilizó alambre de platino de un calibre de 0.5mm, de 1.5 cm de largo, para formar la punta del electrodo, estos segmentos de platino fueron soldados (soldadura con aleación estaño/plomo (60/40)) al núcleo de cobre de un cable coaxial para radiofrecuencia RG-174 A/U, impedancia 50 ohmios con 2,79 mm de diámetro; una vez que fue soldado el cable a la punta de platino, se montaron en un tubo de acrílico de 1.3 cm de diámetro por 10 cm de largo al cual se le vertió una resina epóxica; ya formados los electrodos estos se montaron en una caja de registro con una tablilla de conexión “kulka” en donde la malla metálica del cable coaxial fue conectada a tierra y el núcleo de cobre se ubicó en una posición determinada de la “kulka”.

Para probar que los electrodos estaban funcionando correctamente se probaron bajo condiciones de laboratorio con una solución control ORP de HANNA (HI7022y HI 7021 ORP) que debe dar un valor de 470 mv y 240 mv a 25 °C respectivamente

### 7.2 Instalación de electrodos Redox y registro

Con el fin de monitorear el efecto del riego, la lluvia y del nivel freático se establecieron **dos sitios**, uno en la parte media de la chinampa “P1” a un costado de la calicata inicial

(posterior a la descripción y toma de muestras ya mencionado anteriormente) y el otro punto donde se decidió hacer la instalación de los electrodos fue cercano al canal “P2”, para ambos puntos se colocaron tres electrodos de platino por horizonte a 10, 20, 40 y 60 cm de profundidad (figura 8). Para ello se cavó una calicata, y en una de las paredes se insertaron unas puntas guía similares a los electrodos (de 1.3 cm de diámetro por 10 cm de largo), con el fin de poder introducir los electrodos de forma horizontal en el suelo, asegurando el contacto del electrodo con el suelo y evitar bolsas de aire que pudieran interferir en la medición. Las puntas de los electrodos en “P1” apuntaban en dirección Norte y en “P2” las puntas del electrodo apuntaban en dirección sur. El registro se efectuó aproximadamente cada cuatro días, esto en función a la fecha de riego del cultivo.

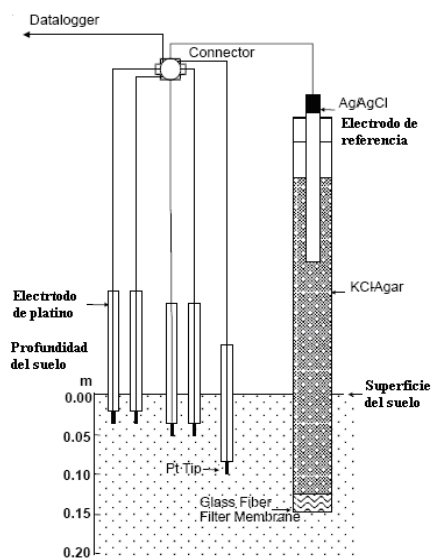


Figura 8. Instalación de electrodos en uno de los sitios de monitoreo con electrodos de platino para la medición de (POR)

Esquema de electrodos de platino Szögi *et al.*, 2004.

### 7.3 Toma de muestras de suelo y lechuga

La parcela se dividió en 3 partes “M1” la parte interna, “M2” la parte media y “M3” la parte más cercana al canal (figura 7). Se realizó un muestreo en forma de “x” tomando 10 sub-muestras superficiales (0-15 cm) de suelo y 10 plantas completas (raíz y hojas) en cada uno de los segmentos para formar 1 muestra compuesta por segmento, tanto para suelo como para el material vegetal.

Para tomar las muestras se extrajo la planta junto con el suelo en torno a las raíces; procurando obtener aproximadamente 0.5 kg de suelo, la planta se sacudió lo mejor posible y se recuperó el suelo asociado. Todas las muestras fueron transportadas en una hielera para conservar la humedad del campo. Las muestras del suelo se preservaron en refrigeración a 4°C hasta su posterior tratamiento, las muestras del material vegetal se procesaron inmediatamente al llegar al laboratorio.

Este procedimiento se realizó en tres ocasiones que corresponden a diferentes etapas del ciclo vegetativo (plántula "E1", juvenil "E2" y adulto "E3"), el tiempo en que tarda una planta en desarrollarse y ser cosechada dura aproximadamente 70 días (2 meses y 10 días) por lo que una vez que se traspasa del chapín a la parcela se muestrea cada 21 días entre cada uno de los estadios vegetativos, esto se llevó a cabo durante dos temporadas, secas (09/marzo a 14/mayo) y lluvias (13/agosto a 12/ octubre) del 2013, por lo que en total se muestreo la chinampa en seis diferentes ocasiones.

Los datos de temperatura y precipitación del año en que se realizó el muestreo se tomaron de la estación meteorológica ubicada en la preparatoria número 1 plantel Xochimilco, de la UNAM, la cual se encuentra cercana al sitio de estudio, que son emitidos en tiempo real (PEMBU, 2013).

#### ***7.4 Análisis de laboratorio***

Los análisis físicos y químicos se realizaron en el laboratorio de la Unidad de Análisis Ambiental (UNAAMB) de la Facultad de Ciencias de la UNAM, la determinación de cationes, aniones, C y N se efectuaron en el Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México

##### ***Suelo***

El suelo fue secado a 60°C en un horno (Precision Scientific Thelco 130D Laboratory Oven), tamizado (malla número 10, < 0.2 mm) y almacenado en bolsas de plástico para su posterior análisis.

##### ***Textura***

Se pesaron 50 gramos de muestra en frascos de vidrio de 500 mL, se humedeció con aproximadamente 100 mL de agua destilada y se procedió a agregar peróxido al 10% (Meyer México) para la destrucción de materia orgánica. Las muestras se dejaron reaccionar (formación de espuma que sube por la pared del vaso) y se agitaron con una varilla de vidrio hasta terminar la reacción. Se adicionaron alícuotas de peróxido de hidrógeno hasta que la reacción ya no fue tan evidente. Después, las muestras fueron colocadas a baño maría a una temperatura < 60°C y se le continuo adicionando el peróxido hasta observar un vire de color más claro y poca efervescencia. Después de destruir los agentes cementantes se efectuó la dispersión de partículas con hexametáfosfato de sodio (Meyer México), para posteriormente proceder a ser analizadas por el método del hidrómetro (Bouyoucos, 1962), el cual se basa en la sedimentación secuencial de las partículas de diferente tamaño.

Como control de calidad se incluyó un blanco de reactivo por duplicado y se midió cada una de las muestras por duplicado.

### ***Densidad aparente***

Se empleó el método del cilindro de un volumen conocido (100cc) tomando la muestra inalterada en campo (Blake & Hartge, 1986), la cual se seca a 105°C para eliminar la humedad, hasta obtener el peso constante. Posteriormente se relaciona el peso del suelo seco con el volumen ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) de la muestra.

Control de calidad

Se tomaron muestras por duplicado en campo.

### ***Densidad real o de partículas.***

Fue determinada con picnómetros de 25 mL. El método del picnómetro (NOM-021-REC/NAT-2000) consiste en obtener el volumen de una muestra de suelo (5 g) en forma indirecta, y está dado por el peso del volumen de agua en un picnómetro con y sin muestra de suelo.

Control de calidad

Se midieron muestras por duplicado.

### ***Porosidad***

La porosidad se obtuvo relacionando la densidad real (DR) y la densidad aparente (DA) del suelo a partir de la siguiente ecuación

$$\text{Porosidad total} = 100 - [(\text{DR} \times 100) / \text{DA}]$$

### ***pH en agua y KCl***

Para la determinación del pH se utilizó el método potenciométrico (NOM-021-REC/NAT-2000). En agua: Se pesaron 12g de suelo en tubos de polipropileno de 50mL. Se adicionaron 30 mL de agua destilada (en relación 1:2.5).

En KCl: Se pesaron 12g de suelo en tubos de polipropileno de 50mL. Se adicionaron 30 mL una solución salina (KCl 1N pH7).

Las muestras se agitaron en un agitador reciproco (Eberbach modelo 5900) a 60 oscilaciones/minuto por un periodo de 18 horas, posteriormente se centrifugaron a 2000rpm (Centrífuga HERMLE Z513) y se tomó la lectura del pH al sobrenadante mediante un potenciómetro Hanna HI8314 calibrado solución buffer J.T. Baker pH4 y 10 México con electrodo de vidrio.

Control de calidad

Se metieron muestras por duplicado y una muestra patrón como control interno (Xico) de la cual se tienen registros desde 1992 y se le da seguimiento con una tabla control.

### ***Conductividad Eléctrica***

Se midió con un conductímetro (Hanna, HI8314 que se calibró con una solución de calibración HI6031 14.13 microS/cm) en un extracto de pasta de saturación.

Preparación de la pasta de saturación. Se pesaron 65 g de suelo seco y se colocaron en un recipiente de plástico, se les agregó agua destilada y se mezcló con una espátula hasta la saturación (brillo en su superficie o formación de un espejo en el dorso al retirar la espátula); se tapó el recipiente y se dejó reposar por 24 horas. Se colocó papel filtro sobre un embudo, se le humedeció con agua destilada, y se montó a un matraz *Kitasato* para conectar a un sistema de vacío; la pasta de saturación se mezcló nuevamente y se colocó en el sistema de vacío hasta obtener un extracto acuoso.

Control de calidad

Las muestras se leyeron por duplicado.

### ***Capacidad de intercambio catiónico***

La CIC se determinó con acetato de amonio ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  1N pH 7) (J.T. Baker) como solución saturante, la determinación de Ca y Mg se realizó mediante espectrometría de absorción atómica (Perkin Elmer Analyst 800) y la determinación de Na y K se realizó por espectrofotometría de flama (Jenway, modelo PFP7).

Control de calidad

Se metieron muestras por duplicado y una muestra interna de laboratorio

### ***Carbono y nitrógeno total***

Las muestras se molieron finamente en un mortero de ágata y se empleó un analizador elemental de combustión (Perkin Elmer 2400 Series II CHNS/O Elemental Analyzer), bajo las siguientes condiciones analíticas: helio como gas acarreador, a 980° C de temperatura de combustión, la temperatura de reducción de 640°C, el detector es Conductividad térmica y el compuesto de calibración acetanilida (Perkin Elmer).

### ***Carbono orgánico disuelto (COD)***

Se determina tanto con agua, como con una solución salina (KCl 2M): se pesaron 6g de suelo en tubos de polipropileno de 50 mL y se les agregó el disolvente en relación 1:5, se les dio un tiempo de agitación de una hora; la suspensión fue centrifugada a 2000 rpm



durante 5 minutos, para posteriormente ser filtradas a  $0.45\mu\text{m}$  (Millipore de nitrocelulosa) (Jones & Willett, 2006). Se determinó la cantidad de carbono orgánico total del extracto obtenido (equipo Apollo 9000 Combustion TOC Analyzer, Tekmar-Dohrmann, EE.UU.), la oxidación fue por combustión a  $680^\circ\text{C}$  y el detector utilizado fue una célula de 125 mm (NDIR). La presión de trabajo fue de 43 psi y se utilizó aire UP como gas de arrastre con un flujo de 150 mL/min.

Control de calidad

Se analizaron muestras por duplicado y blancos.

### ***Cationes/Aniones solubles***

Del extracto obtenido de la pasta de saturación (ver la sección de Conductividad Eléctrica) se tomó una alícuota que se analizó por cromatografía de líquidos con un equipo constituido de una bomba binaria de la marca Waters modelo 1525, un automuestreador marca Waters modelo 717 plus y un detector de conductividad de la marca Waters modelo 432.

### ***Aniones***

La determinación y cuantificación de aniones se realizó utilizando como fase estacionaria, una columna IC-PaK<sup>®</sup> de Waters cuyas dimensiones son: 4.6x75 mm, empleando como fase móvil una disolución constituida de acetonitrilo (Sigma-Aldrich HPLC): butanol (INFRA HDS): gluconato borato de sodio:agua (milli Q a  $18,2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$   $25^\circ\text{C}$ ) en una relación 12:2:2:84 en modo Isocrático a un flujo de 1 ml/min.

### ***Cationes***

La determinación y cuantificación de cationes se realizó utilizando como fase estacionaria una columna metrosep C6 de 250x4.0 mm de la marca Metrohm<sup>®</sup> empacada con partículas de  $5\mu\text{m}$  y utilizando una fase móvil constituida de  $\text{HNO}_3$  1.7 mM (Sigma-Aldrich 70%) y de ácido dipicolínico 1.7 mM (Sigma-Aldrich), en modo Isocrático a un flujo de 0.9 ml/min.

Control de calidad

Se analizaron muestras por duplicado y blancos

### ***Extracción secuencial de metales***

Se hizo para las muestras por horizontes tomadas del perfil del suelo. Se utilizó el método de Zeien & Brüner, (1989) y se modificó el esquema original ya que la "F1" contempla originalmente la fase móvil (metales solubles e intercambiables), por lo que se decidió obtener por separado los metales solubles con agua desionizada (milli Q a  $18,2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$   $25^\circ\text{C}$ ) como extractante, y para los metales intercambiable se utilizó  $\text{NaNO}_3$  de acuerdo con Feng (2005); se tienen 8 fases o fracciones. En la tabla 11 se muestra un esquema del proceso de la extracción secuencial.

Se pesaron 2 g de suelo en envases de polipropileno (Nalgene) y, posteriormente se agregaron 50 mL con el extractante correspondiente. Las muestras se colocaron en un agitador recíproco (Eberbach modelo 5900) a 60 oscilaciones/minuto y posteriormente fueron centrifugadas a 2500 rpm y filtradas (Whatman número 40). Se recuperó el suelo de los filtros y se le agregó el extractante correspondiente para la obtención de la fracción siguiente y volver a repetir los pasos de agitación, centrifugación y filtrado (F1 a F7). El sobrenadante de cada fracción se almacenó para su posterior análisis. Finalmente, el suelo de la F8, que corresponde a la fracción residual fue digerido en horno de microondas (Método Horno de microondas US EPA 351<sup>a</sup> modificado).

Tabla 11. Resumen del proceso de extracción secuencial de metales empleado

Fracción	Descripción	Agente extractante	pH	Tiempo de reacción	de y temperatura
F1	Solubles	Agua		24h	20 °C
F2	Intercambiables	0.1M NaNO <sub>3</sub>		24h	20 °C
F3	Ligados carbonatos	<sup>a</sup> 1M Acetato de NH <sub>4</sub>	6	24	20 °C
F4	Ligados óxidos de Mn	<sup>a</sup> 0.1M hidrocloreuro de hidroxilamina + 1M Acetato de NH <sub>4</sub>	6	30 min	20 °C
F5	Ligados materia orgánica	<sup>a</sup> 0.025 NH <sub>4</sub> -EDTA	4.6	90 min	20 °C
F6	Ligados óxidos de Fe amorfos	<sup>a</sup> 0.2M Oxalato de NH <sub>4</sub>	3.25	4h	20 °C
F7	Ligados óxidos de Fe cristalinos	<sup>a</sup> 0.1M ac. ascórbico + 0.2M oxalato de NH <sub>4</sub>	3.25	30min	96°C
F8	Fracción residual	Digestión Ac./ Asistida por microondas			

Modificado de Zeien & Brümer, (1989)

#### Control de calidad

Tres blancos de reactivo para cada fase y se metió una muestra por duplicado.

Para las muestras compuestas superficiales sólo se cuantificaron los metales solubles e intercambiables con la metodología descrita arriba.

#### **Metales totales en suelo**

Se pesaron 0.3g de muestra y se adicionó 1 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Sigma-Aldrich 30-32%), 5 mL de HNO<sub>3</sub> (Sigma-Aldrich 70%) y 2 mL de HF (FLUKA 48%) se dejó reaccionar 1 hora como predigestión. Se realizó la digestión en un horno de microondas (MARS 5/X CEM Corp.) y

se adicionaron 2 mL de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (J.T. Baker) saturado y 10 mL de agua desionizada (milli Q a18,2 MΩ.cm 25° C) para obtener un aforo de 20 mL (tabla 12)

Tabla 12. Condiciones del horno de microondas para la digestión de suelo.

Rampeo	Potencia	Presión	Temperatura
1	1200 W	300 PCI	170°C
2	1200 W	300 PCI	185 °C
3	1200 W	300 PCI	185 °C
4	1200 W	300 PCI	185 °C
5	1200 W	300 PCI	195 °C

#### Control de calidad

Se metieron muestras por duplicado, 2 blancos por corrida y 2 muestras de material estándar de referencia certificado (Sn Joaquín Soil 2709NIST).

#### *Muestras de material vegetal*

Las plantas de lechuga fueron pesadas, lavadas con agua destilada a presión para eliminar la mayor cantidad de partículas de suelo adheridas y se sumergieron dentro de un contenedor con agua acidulada (HNO<sub>3</sub>, 10%) durante tres minutos para eliminar cualquier elemento adsorbido sobre la superficie; posteriormente se enjuagaron varias veces con agua destilada para eliminar el exceso de ácido. Las muestras se secaron en un horno a 60°C, y las hojas se molieron en un mortero de ágata y las raíces en un molino de aspas (Fritsch PULVERISETTE 14) y se guardaron en bolsas de papel para su posterior análisis.

Se determinaron metales totales en hojas se pesaron 0.3 g de material vegetal y se les adicionaron 10 mL de HNO<sub>3</sub> (Sigma-Aldrich 70%) y se dejó reaccionar durante una hora como predigestión, posteriormente se efectuó la digestión en un horno de microondas (MARS 5/X CEM Corp.) y se llevó a un aforo de 20 mL con agua desionizada (milli Q a18,2 MΩ.cm 25° C) (tabla 13)

Tabla 13. Condiciones del horno de microondas para la digestión de hojas.

Rampeo	Potencia	Presión	Temperatura
1°	1200 W	300 PCI	150 ° C
2°	1200 W	300 PCI	175° C

Modificado USEPA-3052

En el caso de las raíces se pesaron 0.3g y además de agregar los 10 mL de HNO<sub>3</sub> (Sigma-Aldrich 70%) se les agrego 0.5mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Sigma-Aldrich 30-32%) y se dejó reaccionar por 2 horas de predigestión y al final de la digestión se aforaron a 20mL con agua desionizada (tabla 14)

Tabla 14 Condiciones del horno de microondas para la digestión de raíces.

Rampeo	Potencia	Presión	Temperatura
1°	1200 W	300 PCI	130° C
2°	1200 W	300 PCI	150° C
3°	1200 W	300 PCI	180° C

Modificado USEPA-3051

#### Control de calidad

En cada una de las corridas se metieron muestras por duplicado, blancos de reactivo y hoja de espinaca (NIST 1570 a) como material estándar de referencia certificado.

La determinación de la concentración de los metales se realizó mediante la técnica de espectroscopía de absorción atómica con técnica de flama (FAAS) u horno de grafito (GFAAS) en función a las concentraciones obtenidas. Control de calidad:

En cada una de las corridas se metieron muestras por duplicado, blancos de reactivo y hoja de espinaca (NIST 1570 a) como material estándar de referencia certificado.

La determinación de la concentración de los metales se hizo mediante la técnica de espectroscopía de absorción atómica con sistema de atomización por flama (FAAS) u horno de grafito (GFAAS) en función a las concentraciones esperadas.

#### ***Determinaciones del factor de transferencia (suelo/planta) y factor de translocación (raíz/hojas)***

Se determinó el factor de transferencia que está relacionando la concentración de metal registrada en tejido vegetal (hojas y raíces) y la concentración del metal (total) en suelo.

Factor de transferencia = Concentración del metal en tejido vegetal / Concentración (total) de metal en el suelo

Se determinó el factor de translocación de raíz a la parte aérea de las plantas a partir de las concentraciones registradas tanto en la parte aérea como en la raíz.

Factor de translocación = Concentración de metal en hojas / Concentración de metal en la raíz

### ***7.5 Análisis estadístico:***

Se aplicó una prueba t-Student para probar si hay diferencias significativas entre la temporada de secas y la de lluvias en los resultados de las variables medidas en el suelo (95 % de confianza) (software PRISMA).

Se utilizó un análisis de la varianza (ANOVA) para probar si se encontraban diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los diferentes estadios vegetativos (plántula, juvenil y adulto), entre órganos (hojas y raíces) y entre las temporada (secas y de lluvias) (Software PRISMA).

Se utilizó un análisis multivariante de la varianza (MANOVA) para determinar las diferencias significativas entre los diferentes estadios vegetativos y si presentaban diferencias entre temporada de secas y lluvias (STATISTICA v10).

Se empleó un análisis de regresión lineal múltiple por pasos (Stepwise Regression)

Este análisis permite cuantificar la relación que hay entre variables, en este caso fue determinar como afectan las variables propuestas a medir con respecto a la movilidad de metales en el suelo y determinar la dependencia entre ellas, con la recta de “mejor ajuste” a la distribución en un diagrama de puntos dispersión. La regresión por pasos permite introducir las variables que no se encuentren en la ecuación pero en cada paso puede reconsidera mantener o no las variables ya introducidas, de esta manera pueden eliminar variables del modelo, se da por finalizado cuando ya no hay más variables candidatas a ser incluidas o eliminadas. (JMP v8)

## 8. RESULTADOS

### 8.1 Manejo de la chinampa

Se aplica en la chinampa cerca de 1.5 ton/ha/año de abono de caballo y paja (composteadas previamente, en proporción 1:3 respectivamente (figura 9),; el abono se extiende por toda la chinampa una vez aplicado, éste se incorpora al suelo con un motocultor que a la vez permite al agricultor aflojar la tierra e ir formando los surcos, los cuáles posteriormente son protegidos con un acolchado plástico (que le permite mantener la humedad y protege del viento), y deja ya preparado el terreno para poder recibir el cultivo.

En la chinampa se siembran solo lechugas, las cuales son germinadas tres semanas antes de labrar el terreno en almácigos o “chapines”. Anualmente el agricultor recoge 4 cosechas ya que el cultivo de la lechuga dura tres meses. En la temporada de secas, riega cada tercer o cuarto día y en la temporada de lluvias no lo hace en los primeros dos meses y quince días por el aporte de lluvia, pero a finales de la temporada este aporte es menor y en ocasiones requiere de una cierta humedad y el agricultor es quien determina cuando se requiere regar el cultivo. Las principales plagas son la gallina ciega (*Phyllophaga* spp), áfidos o pulgones, así como hongos de la pudrición; por lo que aplica frecuentemente diferentes tipos de plaguicidas como el “AGRIMYCIN 100” “CAPTAN 50”, “CUPRADIN” o “DIAZINÓN”, el cual dosifica en diversas ocasiones, cuando la planta se encuentra en chapín o almácigos y cuando el cultivo llega a presentar alguna plaga.



Figura 9. Proceso de manejo de la chinampa y aplicación de abono.

En la chinampa el agricultor fertiliza la parcela con una sola aplicación en los primeros meses del año de 50 kg/ha de Nitrofoska azul 12-12-17-2 y 100 kg/ha de urea. El agricultor aplica 100 kg de cal o azufre/ha/año con el fin de matar huevos de helmintos (figura 10), lo cual podría modificar el pH en un futuro a pesar de la alta capacidad de amortiguamiento que presenta el sitio de estudio, ocasionalmente solía aplica “Splendor” el cual es un regulador de crecimiento a base de citoquininas u ocupar el “Megafol” el cual es a base de aminoácidos, para fomentar el desarrollo foliar.



Figura 10. Fertilizantes aplicados por el agricultor en el manejo de la chinampa.

## 8.2 Descripción del suelo

### 8.2.1 Información de campo

#### A) Información acerca de la localidad

Nombre del sitio: Chinampa de San Gregorio Atlapulco

Clasificación del suelo: WRB Antrosol Térrico

Fecha de descripción: 22-11-2012

Descripción: Horacio D. Carranza Bautista

Localización: a 800 m. de la avenida Nuevo León, entrando por calle la Huerta

Coordenadas en UTM: 14Q 0493032 E, 2129769 N

Coordenadas en grados: 19°15'41.54''N, 99°03'58.68''O

Altitud: 2244 msnm

Forma de terreno circundante: chinampas

Posición fisiográfica: planicie

Pendiente: Plano

Uso de suelo o vegetación: uso de suelo agrícola (figura 11)

Tiempo: soleado

#### B) Información general acerca del suelo

Material o roca basal: Sedimento lacustre y material vegetal

Drenaje natural: Moderado

Condiciones de humedad en el perfil: seco el horizonte superficial y fresco a profundidad

Profundidad: 95 cm

Manto freático: No determinado, la profundidad del agua en los canales colindantes fue de 1.5 m, respecto a la superficie de la chinampa.

Presencia de rocas superficiales: No  
Presencia de erosión: No apreciable  
Presencia de sales o sodio: No apreciable  
Influencia humana: Chinampa/Actividad agrícola



Figura 11. Parcela de estudio, ubicada en la zona chinampera de San Gregorio Atlapulco (Izquierda) y vista del canal más próximo a la chinampa (Derecha) en el que se aprecia el nivel del agua aproximadamente a 1.5m de la superficie de la chinampa.

### ***C) Descripción general del perfil***

Es un perfil con 95 cm de profundidad, relativamente uniforme en cuanto a color (negro 10YR 1.7/1), por lo que la diferenciación de horizontes se hizo por variaciones en la textura, densidad aparente, presencia de grietas y raíces, siendo difusos los límites entre horizontes; la densidad de raíces es baja en los primeros horizontes (ya que no había cultivo al momento de la descripción) y a profundidad se considera alta, presenta un drenaje moderado. La estructura es granular y subangular de fina a muy fina de grado moderado en superficie (0 a 30cm de profundidad), en la cara de los agregados se aprecian poros comunes, intersticiales y tubulares de finos a muy finos; de los 30 a los 90 cm de profundidad la estructura se vuelve masiva, y en la parte más profunda de 90-95 cm de profundidad se presenta una capa de color gris claro (7.5YR 7/1), que se identificó como una capa de diatomeas y concuerda con lo descrito en otros perfiles de suelos de Xochimilco (Reyes O. y García C., 2004). Esta capa podría estar marcando el límite con los sedimentos lacustres sobre los que los antiguos pobladores fueron formando el suelo antrópico. En la cara del perfil se ven grietas de diferentes tamaños (desde un milímetro de ancho y unos 5 cm de largo hasta grietas más notorias y profundas de aproximadamente un cm de ancho por 20 cm de largo) (figura 12).

### ***D) Descripción del perfil por horizontes***

0 – 20 cm de profundidad

El color en húmedo fue negro (10YR 1.7/1), pH con valor de 7, estaba seco, la densidad de raíces era baja, sin piedras, la estructura fue granular fina a muy fina, con una estabilidad de



agregados de moderada a baja, con poros comunes, de forma intersticiales y tubular de finos a muy finos, la textura al tacto fue franco arcillo-limosa (CRL).

20 – 30 cm de profundidad

Color en húmedo negro (10YR 1.7/1), con un pH de 6.5 a 7 y la humedad fresca, la densidad de raíces fue baja, sin piedras, la estructura fue granular fina a muy fina, con una estabilidad de agregados de moderada a baja, con poros comunes, de forma intersticiales y tubular de finos a muy finos y la textura al tacto fue (CRL) franco arcillo-limosa.

30 – 63 cm de profundidad

El color del suelo en húmedo es negro (10YR 1.7/1), con un pH de 6.5 a 7, la humedad se considera fresca, la densidad de raíces se incrementó a partir de este punto registrando una alta densidad de raíces, la pedregosidad continua siendo nula, la estructura es masiva y la textura al tacto fue franco arcillosa (CR).

63 – 90 cm de profundidad

Se registró un color negro (10YR 1.7/1), con un pH de 6.5 a 7, la humedad registrada fue fresca, la densidad de raíces fue alta, sin piedras, con una estructura masiva y la textura al tacto registrada fue (CL-F) franco limosa fina.

90 – 95 cm de profundidad

Color gris claro (7.5YR 7/1), con un valor pH de 6.5 a 7, la humedad fresca, no se registraron raíces a esta profundidad, la presencia de piedras fue nula, se dio una estructura masiva y la textura al tacto fue catalogada como franco arenosa (CA).



Figura12. Vista de la calicata realizada al centro de la chinampa de estudio (Izquierda) y grietas encontradas, principalmente en el fondo del perfil (Derecha).

#### **D) Interpretación de las características del suelo**

Procesos pedogenéticos dominantes.

Recibe aportes antrópicos continuos de material proveniente de los sedimentos de los canales aledaños a las chinampas, también materia orgánica se está depositando de forma constante, ya que año con año el agricultor incorpora una gran cantidad de abono de caballo mezclado con paja, que mineraliza y se humifica. Esto último se reconoce por los colores oscuros en todos los horizontes del perfil.

##### ***8.2.2 Características edafo - ecológicas***

En este sitio presenta una gran cantidad de tierras de cultivo las cuales se encuentran delimitadas por canales y ahuejotes formando así las chinampas, el sitio es plano y no existe inclinación alguna del terreno, aunque se tienen reportes por parte de los agricultores de zonas que se presentan constantemente hundimientos importantes cercanos al sitio de estudio; el suelo es profundo, presenta un color negro, la pedregosidad es casi nula, lo que permite un desarrollo profundo de las raíces con un espacio poroso medio y capacidad de aireación media, y un drenaje natural bueno, por consiguiente las condiciones son moderadamente oxidantes; en este sitio las plantas tienen una alta disponibilidad de agua, cuenta también con una alta capacidad de campo, por lo que retiene una buena cantidad de nutrientes en solución, que estarán disponibles como bases intercambiables, por lo que el sitio puede considerarse que tiene una alta fertilidad apropiada para la agricultura; el suelo que se ha desarrollado en este sitio es muy joven por lo que presenta una estructura débilmente desarrollada o como en el caso de los horizontes profundos, no presentan una estructura y son suelos masivos.

### 8.2.3 Características físicas y químicas del suelo a lo largo del perfil

#### Textura

En los primeros dos horizontes de 0-30 la textura se clasifica como “franco limosa”. la figura 13 (A) la arcilla presenta un porcentaje de 19%, la fracción del limo figura 13(B) se registro 52%, y 28% corresponde a la arena figura 13 (C), en el horizonte que va de los 30 a los 63 cm de profundidad se percibe un ligero aumento en el contenido de arcilla 22% y de arena 32% y es una textura “franca”; en el siguiente horizonte (63- 90cm) presenta 32% arcillas y 56% de limo y 12% de arena, siendo una textura “franco arcillo limosa”. En la capa de diatomeas a 90 cm domina la fracción de arena es del 58% y su textura es “franco arenosa”

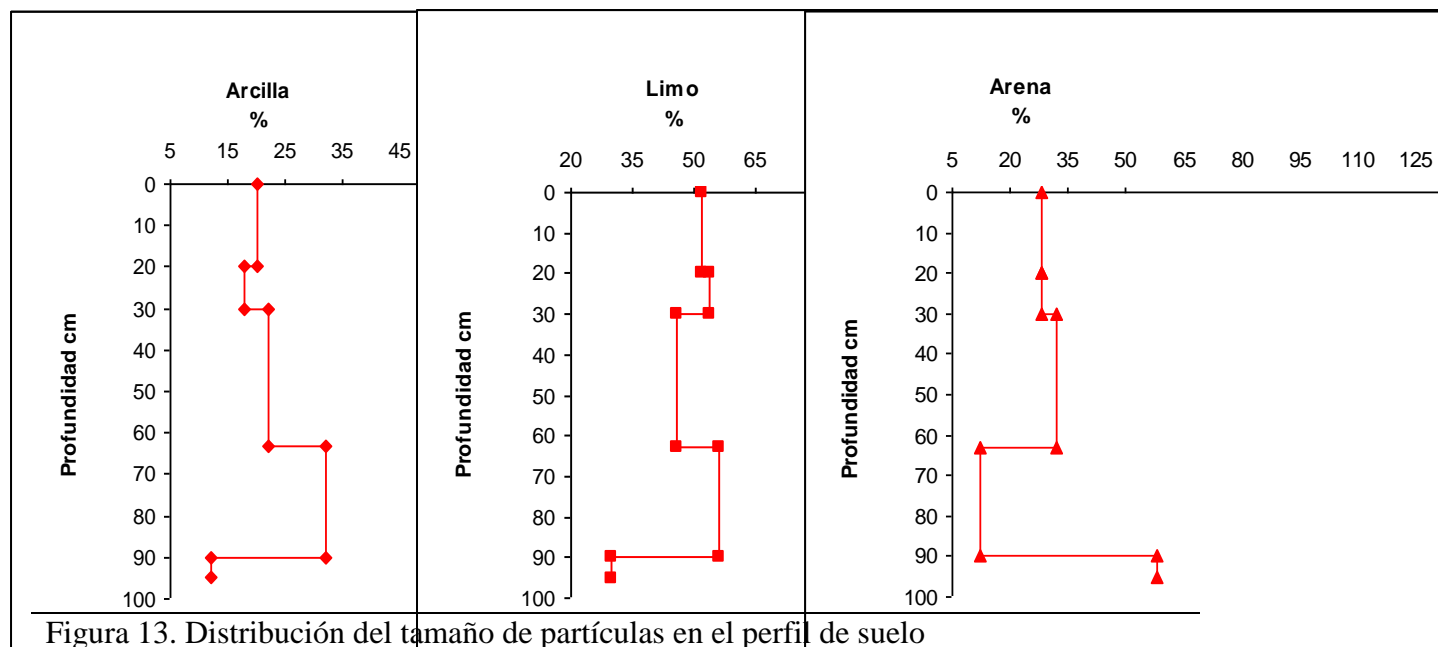


Figura 13. Distribución del tamaño de partículas en el perfil de suelo

#### Densidad real

Cada horizonte presenta una densidad de partículas diferente, teniendo el horizonte superficial una densidad mayor. La densidad real menor se encuentra entre los 63 a 90 cm de profundidad. Esta variabilidad refleja el aporte de materiales de diferente naturaleza que recibió el suelo durante su formación. En general se puede ver que la densidad real a lo largo del perfil se encuentra en promedio en los  $2.2 \text{ g/cm}^3$ , que presenta una clasificación media para tipo de suelos volcánicos, cabe mencionar que el horizonte comprendido entre los 63 a 90 cm de profundidad registra un valor de  $1.9 \text{ g/cm}^3$  el cual se considera tiene una densidad baja, de acuerdo con Kim, (2005) (figura 14 A)

#### Densidad aparente

En los registros obtenidos se considera que son valores característicos de suelos orgánicos (Kim, 2005), en los primeros tres horizontes, de 0 a 63 cm de profundidad se registró un valor de  $0.7 \text{ g/cm}^3$ , de 63 a los 90 cm de profundidad se registró de  $0.5 \text{ g/cm}^3$ , por último en el horizonte que va de los 90 a los 95 cm de profundidad se tiene un valor de  $0.6 \text{ g/cm}^3$

el cual al ser una capa de diatomeas no se va a comparar con el resto de las capas antes mencionadas (figura 14 B).

Porosidad en los primeros tres horizontes el porcentaje de porosidad va disminuyendo gradualmente y en el horizonte entre los 63 a 90 cm de profundidad se da un incremento, registrando un 75% (figura 14 C).

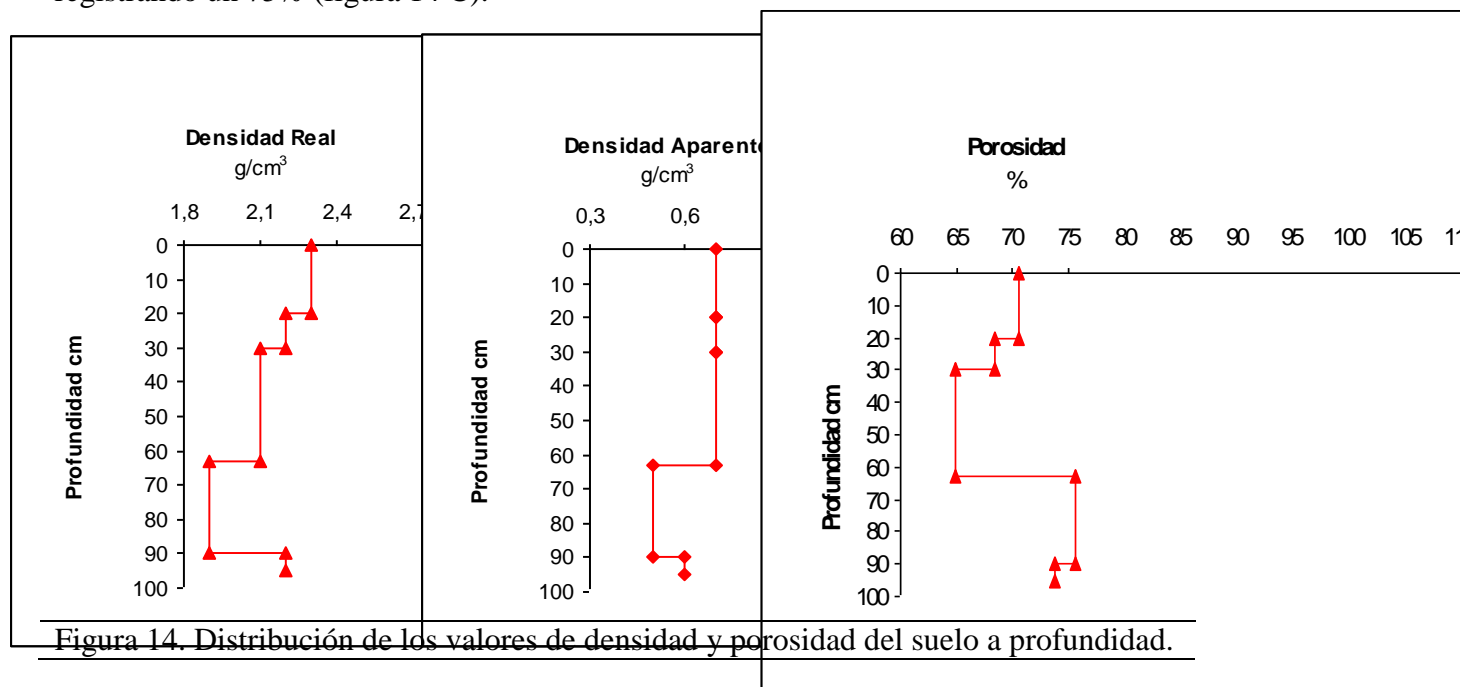


Figura 14. Distribución de los valores de densidad y porosidad del suelo a profundidad.

### Carbono total

En los tres primeros horizontes se registró un promedio de 7.8 % de carbono orgánico y se ve un incremento aproximadamente del doble en el siguiente horizonte 17.5 %. En el último horizonte se registró un contenido de 1.6 % (figura 15 A).

### Nitrógeno

Los valores registrados para el nitrógeno en el perfil van de 0.6 % en los dos primeros horizontes de 0 a 30 cm de profundidad, de 30 a los 63 cm de profundidad se registró un valor de 0.3 y de 1.1% de nitrógeno de los 63 a los 90 cm de profundidad, por último de los 90 a los 95cm de profundidad se tiene 0.1% de nitrógeno (figura 15 B).

### Relación Carbono Nitrógeno (C:N)

De acuerdo con Velázquez, (1997) la relación carbono nitrógeno en los dos primeros horizontes es media (C:N=13), en el siguiente horizonte es muy alta (C:N=26) y en los últimos dos horizontes es alta (C:N=16).

### Carbono orgánico disuelto (COD)

La concentración de carbono orgánico disuelto varía a lo largo del perfil (figura 15C), de 0 a 20 cm de profundidad se registró un valor de 107.61 mg de COD/L, posteriormente de 20 a 30 cm de profundidad aumenta a 131.84 mg de COD/L, y de 30 a 63 cm de profundidad

disminuye casi a la mitad con respecto al registro anterior (68.92 mg de COD/L), de los 63 a los 90 cm de profundidad se un incremento a 197.63 mg de COD/L, y en el último horizonte se registró un descenso 53.36 mg de COD/L.

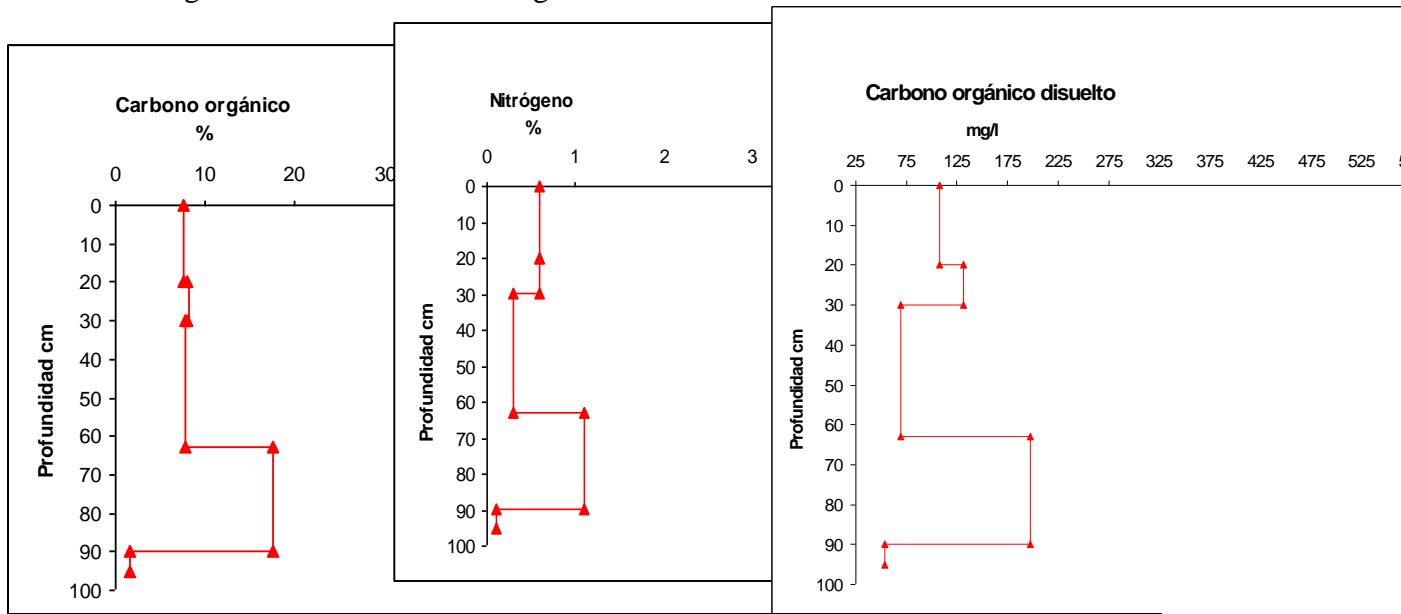


Figura 15. Distribución del nitrógeno y carbono orgánico particulado y disuelto en el perfil de suelo.

### Potencial de Hidrógeno

En la figura 16 (A) se observa que el pH en H<sub>2</sub>O presenta valores de 7.4 a 7.9 a lo largo del perfil, que de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 corresponden a un pH moderadamente alcalino y con respecto al pH obtenido con KCl o pH intercambiable (figura 16 B) corresponde a la categoría de neutro ya que se registraron valores cercanos a 7.

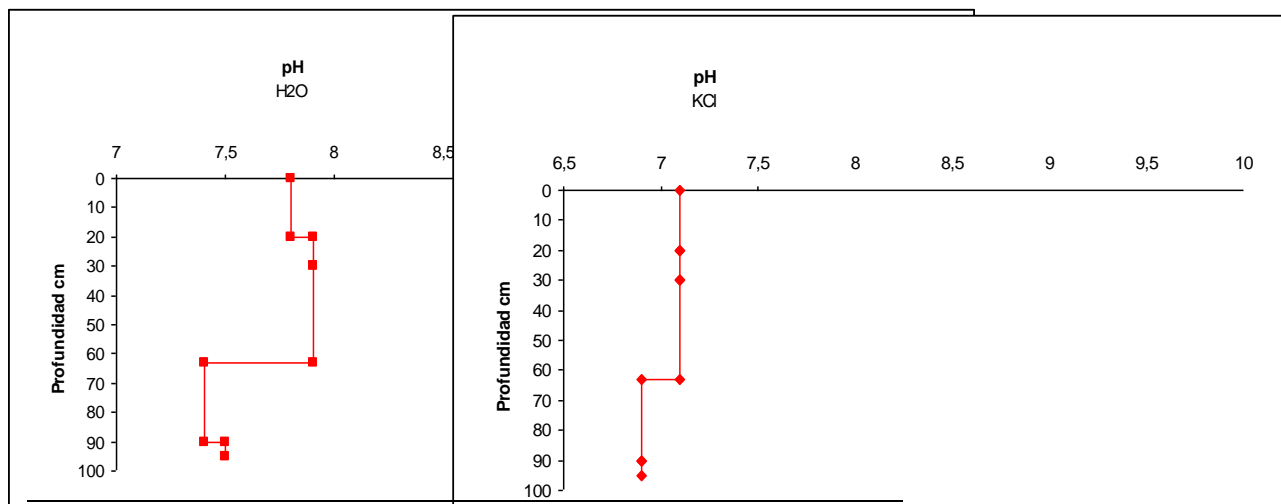


Figura 16. Distribución de los valores de pH en el perfil del suelo.

## Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica varía a lo largo del perfil ya que se registraron valores de 3.09 dS/m en el horizonte superficial, a continuación de 20 a 63 cm de profundidad se registró un valor de 1.8 dS/m, a una profundidad de 63 a 90 cm se registró un valor de 3.75 dS/m y de 2.49 dS/m en el último horizonte (figura 17A).

## Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

El valor mínimo registrado de sodio intercambiable fue de 3.7% y se encuentra en el horizonte que va de los 30 a los 63 cm de profundidad y el registro más alto se dio en el último horizonte con un valor de 5.7%. El resto de los horizontes registraron un valor promedio de 4.3% de sodio intercambiable (figura 17B).

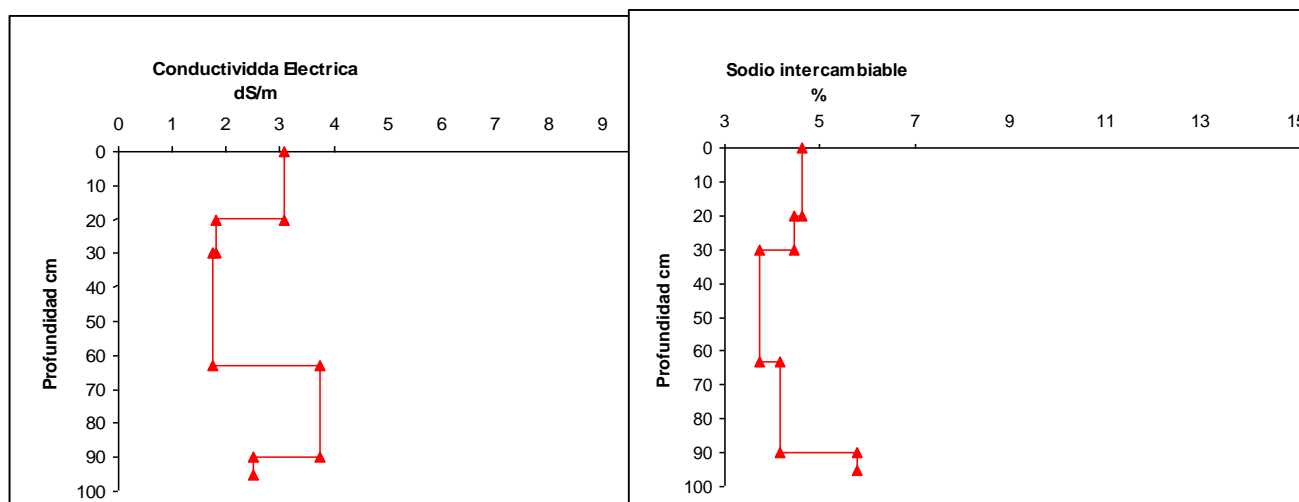


Figura 17. Distribución de conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable en el perfil

De acuerdo con Vázquez (1997) se puede clasificar como un suelo sin problemas de salinidad y sodicidad con base en que  $PSI < 15$ ;  $CE < 4.0$  y generalmente el pH es  $< 8.2$ .

## Bases Intercambiables

En orden de magnitud, el contenido de bases intercambiables se presenta de la siguiente manera:  $Ca > Mg > Na > K$ ; El calcio presenta valores de 32.8  $cmol(Ca^{+})/kg$  en los dos primeros horizontes, a partir de los 30 a los 60 cm de profundidad se registra un incremento de cinco unidades 37.61  $cmol(Ca^{+})/kg$ , de 63 a los 90 cm de profundidad presenta un incremento y se registra 47.29  $cmol(Ca^{+})/kg$ ; para Mg se registró un valor promedio fue de 19.1  $cmol(Ca^{+})/kg$  en los tres primeros horizontes, posteriormente se registró un ligero incremento, 24.2  $cmol(Ca^{+})/kg$ , y en el horizonte de mayor profundidad se registró 14.75  $cmol(Ca^{+})/kg$ ; para el caso del potasio los dos primeros horizontes tienen un valor promedio de 2.7  $cmol(Ca^{+})/kg$ , que disminuye casi la mitad (1.09  $cmol(Ca^{+})/kg$ ) a una profundidad de 30 a los 63 cm y de los 63 a los 95 cm, se reduce nuevamente a la mitad ( 0.43  $cmol(Ca^{+})/kg$ , El sodio, registró en promedio 3.5  $cmol(Ca^{+})/kg$ , para los dos primeros horizontes y el último de estos en tanto que Se registró un valor de 2.9  $cmol(Ca^{+})/kg$  y de 4.3  $cmol(Ca^{+})/kg$  que corresponden de 20 a 30 y de 90 a los 95 cm de profundidad respectivamente (figura 18).

A

B

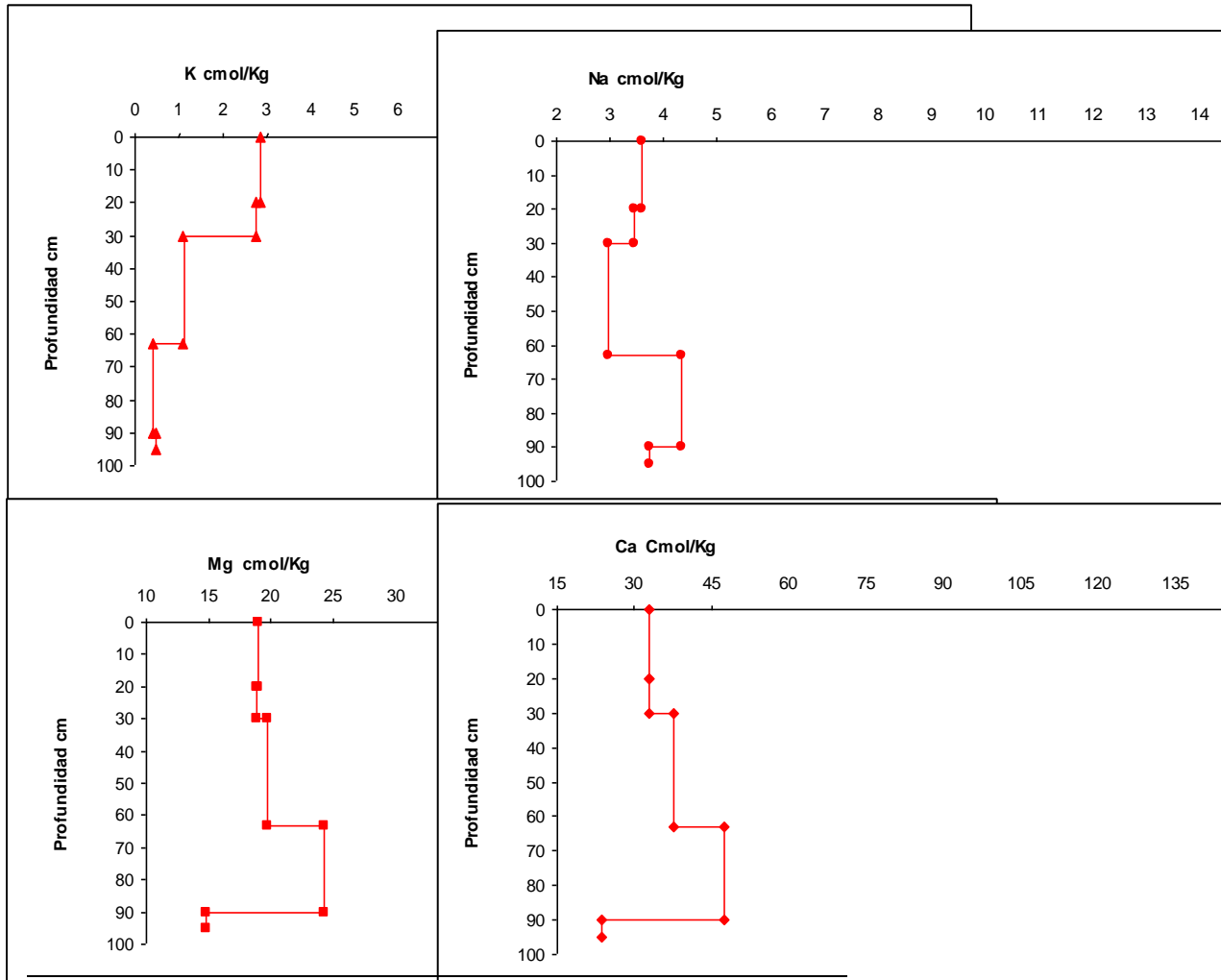


Figura 18. Distribución de las bases intercambiables en el perfil.

### Capacidad de intercambio catiónico total

Se observa en la figura 19 que los dos primeros horizontes presentan un valor de 77.78 cmol/kg, se presenta incremento en el tercer horizonte con respecto al anterior 79.23 cmol/kg y de los 63 a los 90cm se registró 103.79 cmol/kg, respecto al horizonte más profundo el valor correspondiente

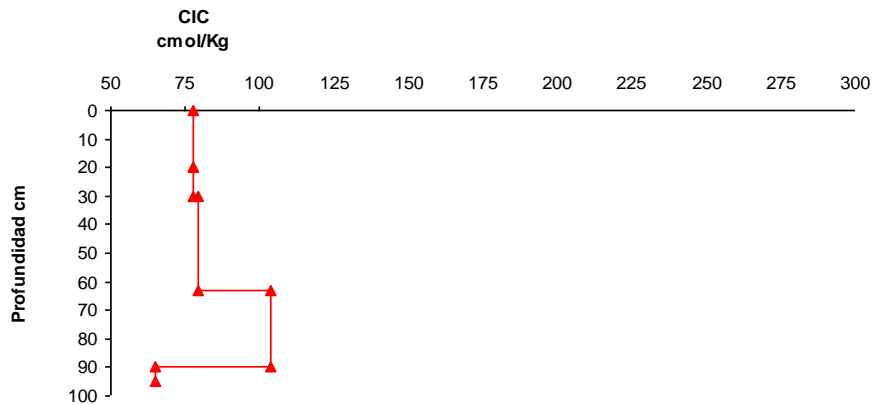


Figura 19. Distribución de la capacidad de intercambio catiónico total en el perfil.

### 8.3 Características del suelo superficial en la temporada de secas y de lluvias

En la reacción del suelo (pH) hay diferencias significativas  $p=0.0004$  entre los valores de la temporada seca y de lluvia. En secas el valor es ligeramente alcalino (7.39) y en lluvias es neutro (6.95) (figura 20).

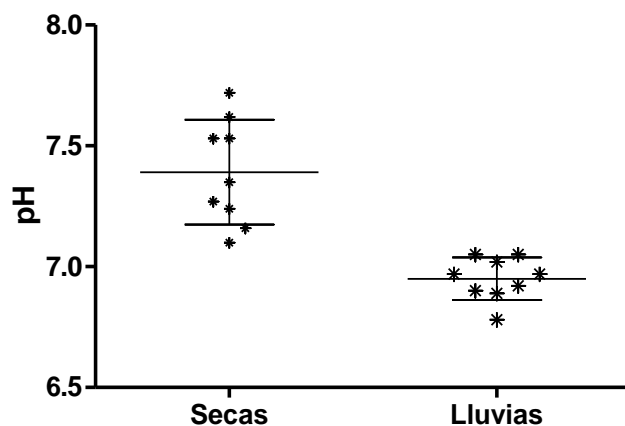


Figura 20. Comparación de valores de pH en suelo superficial de chinampa entre temporadas. Los asteriscos marcan el valor de cada una de las muestras compuestas tomadas durante un ciclo agrícola.

Los contenidos de  $C_t$  no muestran diferencias significativas entre las dos épocas. Se registra un valor promedio de 12.21 % en secas que es ligeramente mayor que el de lluvias (11.36 %) (figura 21).

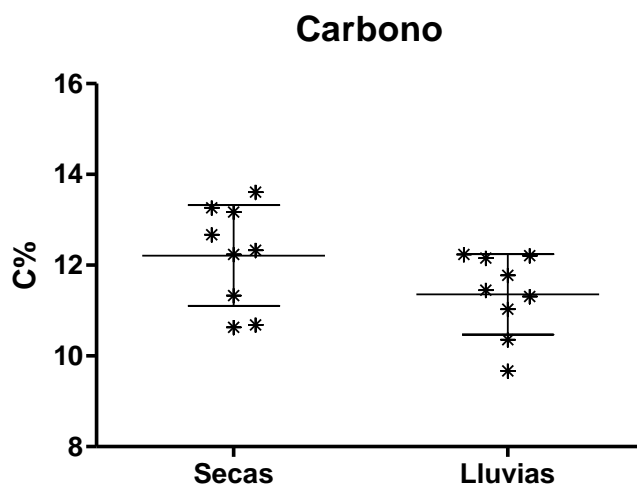


Figura 21. Comparación de valores de  $C_t$  en suelo superficial de chinampa entre temporadas.



El carbono orgánico disuelto (COD) presentó diferencias significativas  $p < 0.0001$  registro un valor de 178.7 mg/L en temporada de secas y de 128.5 mg/L en la temporada de lluvias en donde el valor más alto se registró en temporada de secas (figura 22).

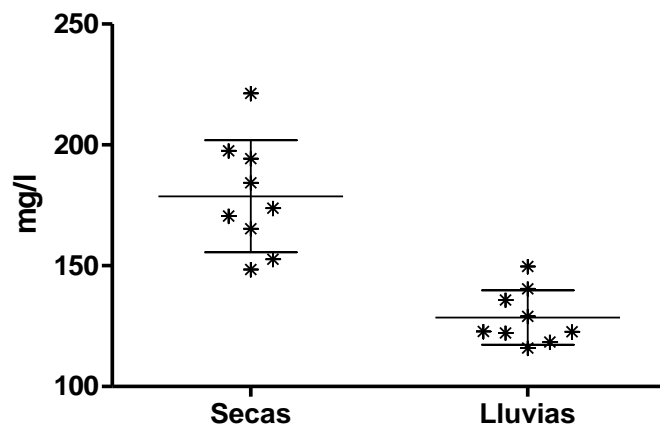


Figura 22. Comparación de valores de Carbono Orgánico Disuelto en suelo superficial de chinampa entre temporadas.

En el caso del nitrógeno se aprecia que no hay diferencias significativas entre los valores registrados entre la temporada de secas y lluvias, los valores promedio fueron 0.89 y 0.82% respectivamente (figura 23).

### Nitrogeno

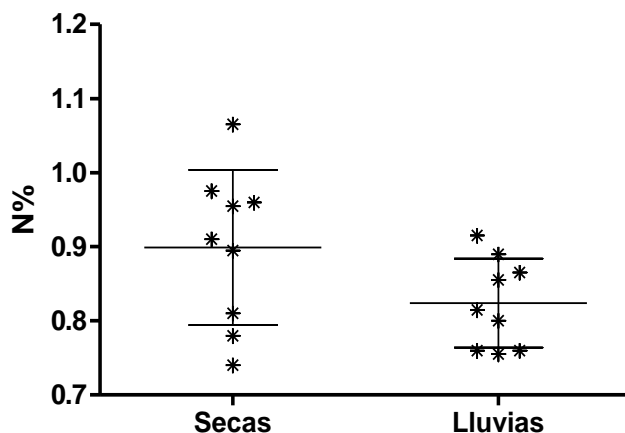
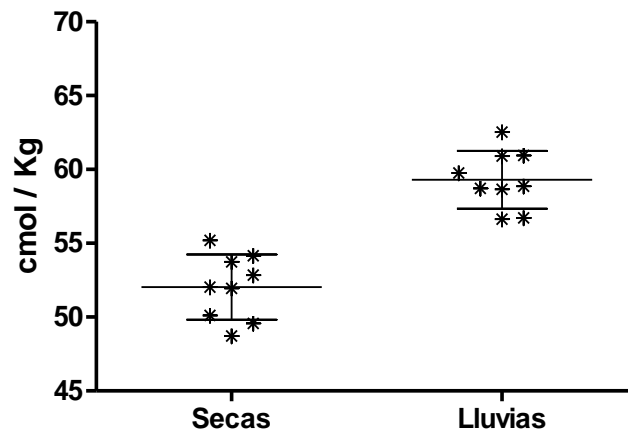


Figura 23 Comparación de valores de nitrógeno en suelo superficial de chinampa entre temporadas.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue mayor en temporada de lluvias (52.04 cmol (+) Kg) respecto a la temporada de secas (59.3 cmol (+) kg) y la diferencia es significativa  $p < 0.0001$  (figura 24)

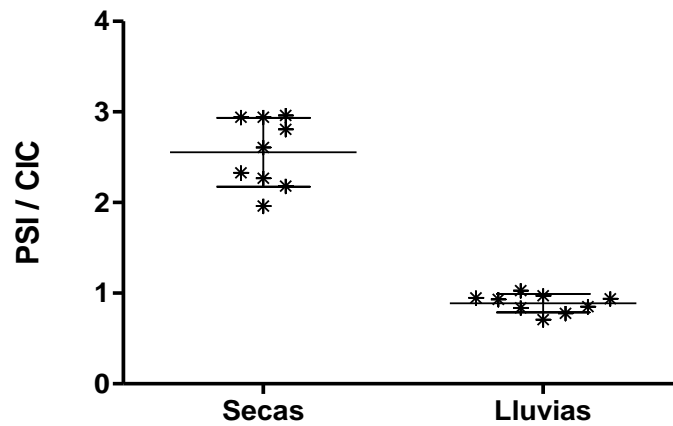



---

Figura 24 Comparación de valores de CIC en suelo superficial de chinampa entre temporadas.

---

En la figura 25 que corresponde al porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se puede apreciar que hay diferencias significativas  $p=0.0004$  entre las dos temporadas, ya que en secas se registra un valor de 2.6 y en la temporada de lluvias de 0.93 PSI/CIC.




---

Figura 25. Comparación de valores de PSI en suelo superficial de chinampa entre temporadas.

---

#### 8.4. Mediciones de potencial redox.

En las figuras 26 y 27 se observa que en las cuatro profundidades en las que se registró el potencial redox se tiene un comportamiento de forma oscilatoria y los valores para cada una de las profundidades se mantienen paralelos entre sí.

Perfil 1 (centro de la parcela)

En la figura 26 se observa que a mayor profundidad los valores registrados son altos, esto significa que es más aerobio a 60 cm de profundidad que en la superficie y el grado de aeración registrado se da de la siguiente manera  $60 > 40 > 10 > 20$  cm de profundidad.

Los valores oscilan de 430 mV a 320 mV durante la temporada de secas y en lluvias oscilan de 425mV a los 270 mV.

Los valores registrados a 60 cm y a 40 cm de profundidad presentan un comportamiento ligeramente diferente a los registros obtenidos a 10 cm y 20 cm de profundidad.

Se puede ver que los registros obtenidos a una profundidad de 60 y 40 cm durante la temporada de secas se mantienen cercanos a los 400 mV mientras que en la temporada de lluvias estos valores disminuyen y en general se aprecian valores cercanos a los 350 mV.

Los valores registrados para la parte superficial de 10 cm y de 20 cm de profundidad presentan de manera general cercanos a 350 mV tanto en secas como durante un periodo de la temporada de lluvias, ya que al final de dicha temporada se observa como los valores descienden hasta los 270 mV y posteriormente se observa un aumento gradual.

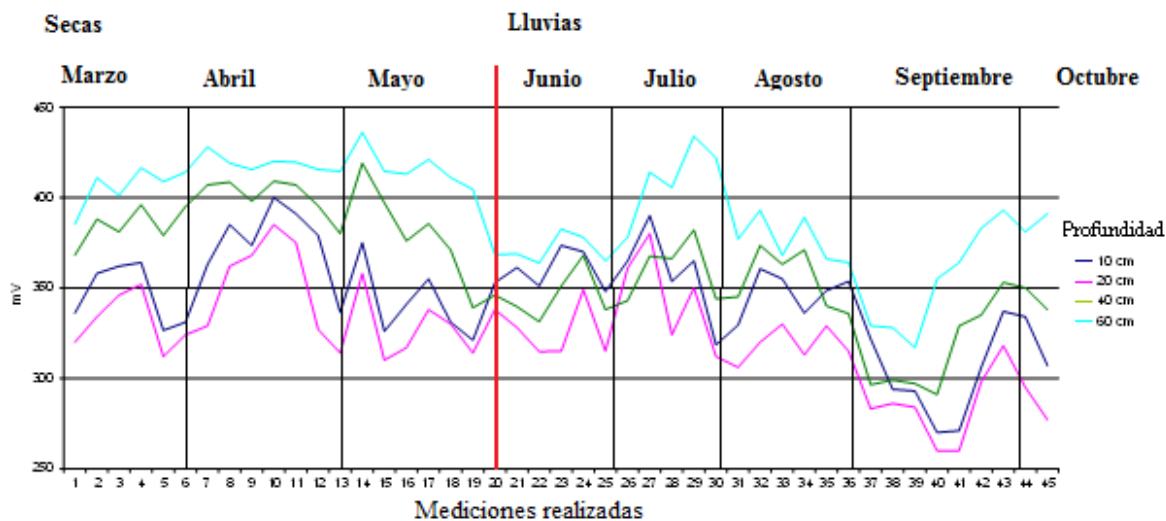


Figura 26. Potencial redox medido durante dos temporadas (seca y lluvia) en 4 profundidades de un perfil de suelo en el centro de la chinampa (P1).

### Perfil 2 (cercano al canal)

En la figura 27 se observa que los valores más altos se presentan en la superficie, se considera que son los más aerobios y conforme aumenta la profundidad disminuye el valor, de tal forma que a 60 cm de profundidad se registró un valor menos aerobio que el de la superficie, por lo que el grado de aeración de mayor a menor va de 10>20>40>60.

Se observa que los valores registrados entre los 10 cm y los 20 cm de profundidad en promedio se encuentran entre los 370 y los 455 mV, en tanto que los valores registrados a una profundidad de 40 y 60 cm se encuentran cercanos a los 370 mV y los 275 mV.

En la temporada de secas se aprecia que los valores registrados para cada una de las profundidades son más uniformes en cuanto a su comportamiento, respecto a la temporada de lluvias. También al iniciar la temporada de lluvias se aprecia que los registros más superficiales de 10 cm y 20 cm de profundidad presentan un aumento en los valores, en tanto que a 40 cm y 60 cm de profundidad, para el mismo periodo, se ve que los valores disminuyen. También se aprecia como a finales de la temporada de lluvias (septiembre) se registraron los valores más bajos para todos los horizontes.

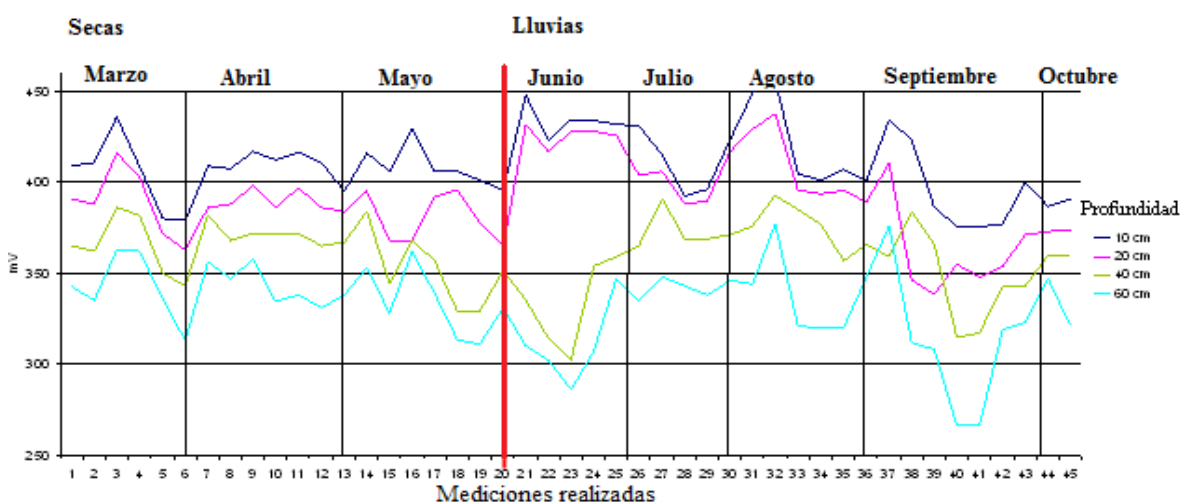


Figura 27 Potencial redox medido a lo largo de dos temporadas (seca y lluvia) en 4 profundidades de un perfil de suelo en la orilla de la chinampa “cercano al canal” (P2).

Para analizar la variación temporal entre la temporada de secas y lluvias del potencial redox se graficaron los datos obtenidos de p1 (a una profundidad de 20 cm “zona radicular”) del monitoreo, ya que el cultivo se desarrolla aproximadamente en 9 semanas. Cada uno de los asteriscos representa el valor promedio semanal.

El potencial de óxido reducción se muestra en la figura 28 y se observa que hay diferencias entre ambas temporadas  $p=0.0142$ , registrándose un valor promedio de 372 mV para la temporada de secas y de 344 mV para la temporada de lluvias, en la temporada de secas los valores son más altos, lo que representa un mayor grado de aeración con respecto a los registros obtenidos en lluvias en donde los valores descienden ligeramente. Se ve que en la temporada de lluvias los datos son más variables.

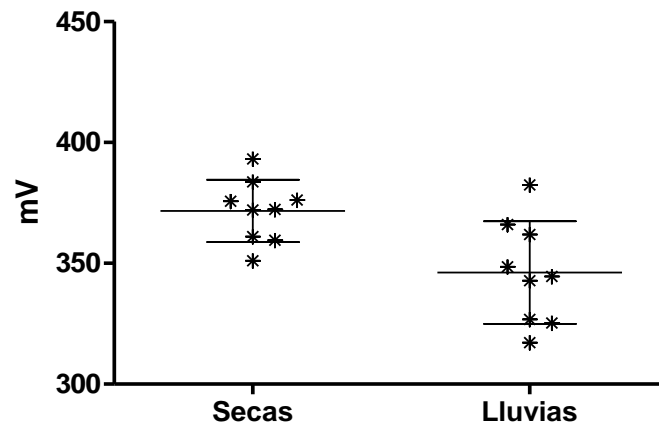


Figura 28. Comparación de valores de potencial oxido reducción a 20 cm de profundidad, entre temporadas, cada uno de los asteriscos representa el valor promedio semanal proveniente del monitoreo en el perfil 1.

En temperatura, hay diferencias  $p=0.0188$  entre las dos temporadas y se registraron los siguientes valores  $18.79\text{ }^{\circ}\text{C}$  en promedio para la temporada de secas y  $17.31\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la temporada de lluvias (figura 29).

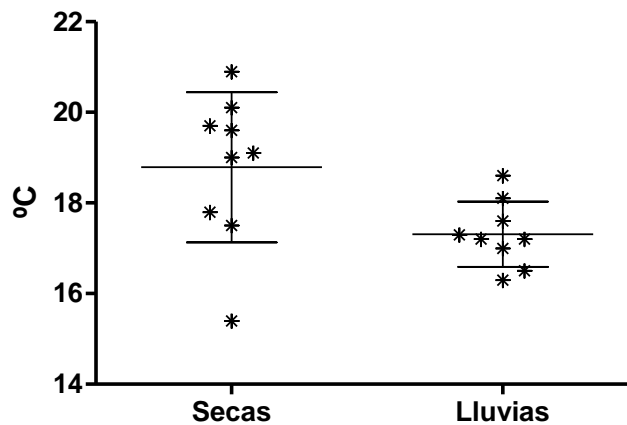


Figura 29. Comparación de valores de temperatura entre temporadas. Cada uno de los asteriscos representa el valor promedio semanal obtenido de la estación meteorológica de la ENP1.

Los valores de precipitación registrados en la temporada de secas para la zona de estudio fueron en promedio de  $0.34\text{ mm}$ , y para la temporada de lluvias fueron de  $5.1\text{ mm}$  y muestran diferencias  $p=0.0034$  (figura 30).



### 8.5.2 Determinación de cationes en pasta de saturación

En la figura 32 se aprecia que hay diferencia  $p < 0.05$  entre la temporada de secas y la temporada de lluvias, y que presentan el siguiente orden de magnitud: en la temporada de secas  $Mg > Ca > Na > K > NH_4$  y en lluvias el orden es el siguiente:  $Mg = Ca > Na = K = NH_4$

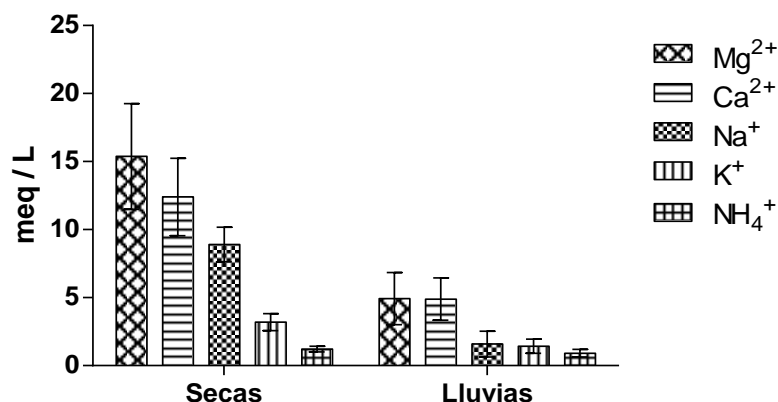


Figura 32. Comparación de la concentración de cationes en pasta de saturación entre temporadas, medidos en muestras compuestas tomadas durante cada uno de los ciclos agrícolas  $n=9$  por temporada.

### 8.4.3 Aniones en pasta de saturación

La concentración de aniones en la temporada de secas es mayor respecto a la temporada de lluvias. Hay diferencias entre la concentración de sulfatos y cloruros entre ambas épocas, mas no entre bicarbonatos y nitratos. En temporada de secas se da la siguiente relación respecto a la concentración  $SO_4 > Cl > HCO_3 = NO_3$ . En el caso de la temporada de lluvias el patrón es diferente  $SO_4 > Cl = HCO_3 = NO_3$  (figura 33)

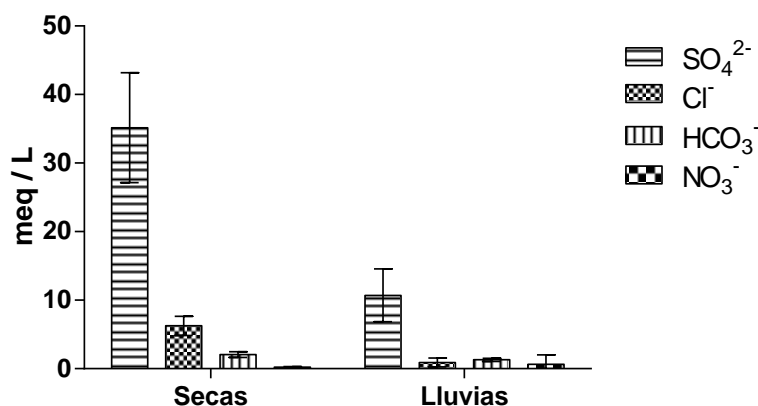


Figura 33. Comparación de las concentraciones de aniones en pasta de saturación entre temporadas, medidos en muestras compuestas tomadas durante cada uno de los ciclos agrícolas  $n=9$  por temporada.

## **8.6 Concentración de metales en suelo**

### **8.6.1 Descripción de la concentración metales totales en el perfil**

En general se puede decir que todos los metales presentan las concentraciones más altas en los horizontes superficiales y las concentraciones más bajas se registran en el horizonte con más materia orgánica (63-90 cm) (figura 34).

#### ***Cadmio***

Los primeros dos horizontes de 0 a 30 cm de profundidad se registró 0.3 mg/kg de Cd. Conforme se desciende a los siguientes horizontes la concentración disminuye en promedio a 0.13 mg/kg (30 a los 95 cm) (figura 34 A).

#### ***Plomo***

De 0 a 30 cm de profundidad se registró un valor promedio de 21.5 mg/kg del metal, posteriormente disminuye en los dos horizontes siguientes de 30 a 63 cm y de 63 a 90 cm de profundidad (11.9 mg/kg y 9 mg/kg respectivamente); el último de los horizontes presentó un valor de 19 mg/kg (figura 34 B).

#### ***Cromo***

Los dos horizontes más superficiales presentan una concentración similar de 60 mg/kg, posteriormente a profundidad (30 a los 63 cm) la concentración aumenta a 88.7 mg/kg y luego disminuye a 40.4 mg/kg y 14.6 mg/kg en los dos últimos horizontes (figura 34 C).

#### ***Cobre***

En los primeros dos horizontes se registró un valor de 24 mg/kg para cada uno, de los 30 a 90 cm de profundidad la concentración baja a 16 mg/kg y de 90 - 95 cm de profundidad se registró un valor de 19 mg/kg (figura 34 D).

#### ***Zinc***

Los valores registrados en los primeros dos horizontes de 0 a 30 cm de profundidad son de 77.6 y 79.9, respectivamente. En los dos horizontes siguientes de 30 a 90 cm de profundidad se registra un valor de 42 mg/kg y en el último de los horizontes se presenta un aumento, registrando un valor de 66 mg/kg (figura 34 E).

#### ***Manganeso***

En los primeros dos horizontes (0 a 30 cm de profundidad) hay una concentración de 286 mg/kg, posteriormente hay un descenso en la concentración del metal en los próximos dos horizontes (30 - 60 y de 60 - 90 cm de profundidad) 230 mg/kg y de 173 mg/kg respectivamente y en el último la concentración es de 291 mg/kg (figura 34 F).



### Hierro

En el caso del hierro, a diferencia del resto de los metales, se observa que conforme aumenta la profundidad éste también aumenta; de 0 a 20 cm de profundidad se registró un valor de 13,807 mg/kg, en los siguientes dos horizontes a partir de 20 cm a los 63 cm de profundidad se tienen concentraciones de 16,003 mg/kg y 16,797 mg/kg respectivamente, en el horizonte a 63 - 90 cm de profundidad se registró un descenso (9,238 mg/kg) en la concentración y en el último de los horizontes vuelve a aumentar (17512 mg/kg) (figura 34 G).

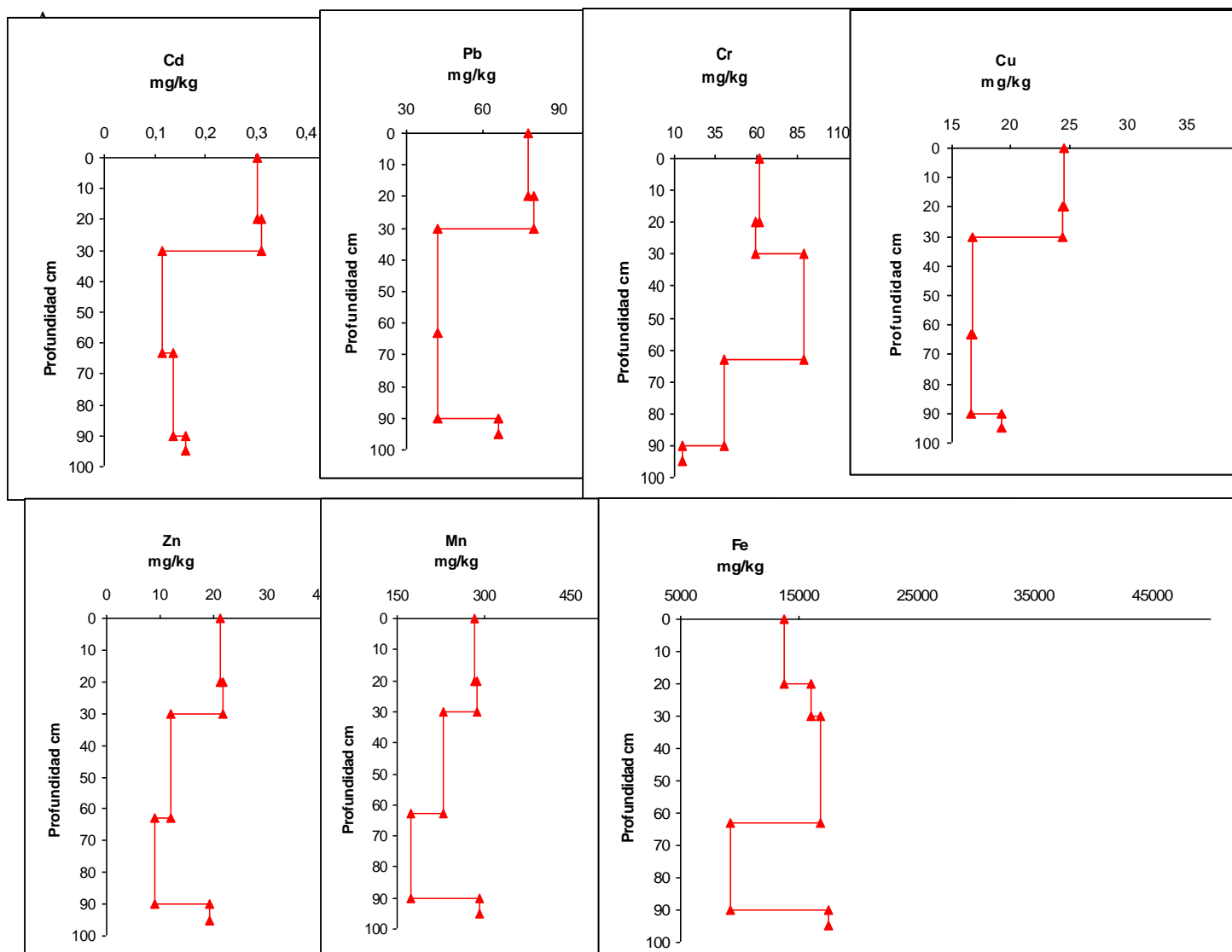


Figura 34. Distribución de la concentración de metales a lo largo del perfil.

### 8.6.2 Contenido de metales en las fracciones del suelo por horizonte

A continuación se representan en grafica de “pay” las diferentes concentraciones de metal, asociado a cada una de las fracciones del suelo, para cada uno de los horizontes determinados en la calicata al centro de la parcela (p1)

#### *Cadmio*

En la figura 35 se aprecia como el cadmio se encuentra ligado principalmente a la materia orgánica en los horizontes más superficiales. Después de los 30 cm de profundidad, se observa que el metal ligado a la fracción residual es la predominante.

Los porcentajes ligados a óxidos de Mn y la fracción ligada a carbonatos son muy similares a lo largo del perfil.

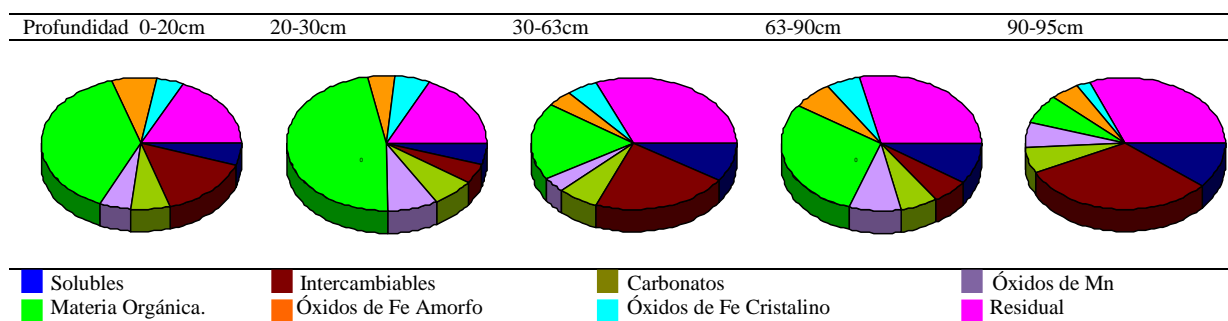


Figura 35. Distribución de % cadmio ligado a distintas fracciones del suelo a lo largo del perfil.

#### *Plomo*

La mayor concentración del metal se encuentra ligada principalmente a la materia orgánica en los primeros dos horizontes. A partir de los 30 cm es la fracción residual la que registra la mayor concentración del metal.

Es de resaltar que en la parte superficial el 10% del plomo se encuentra soluble (figura 36).

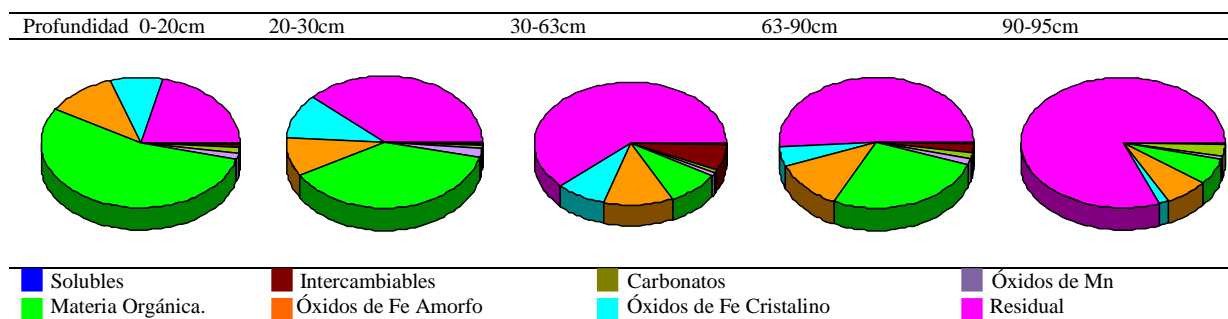


Figura 36 Distribución de % plomo a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo.

### **Cromo**

El 98.5% de la concentración de cromo se encuentra ligado a la fracción residual (figura 37).

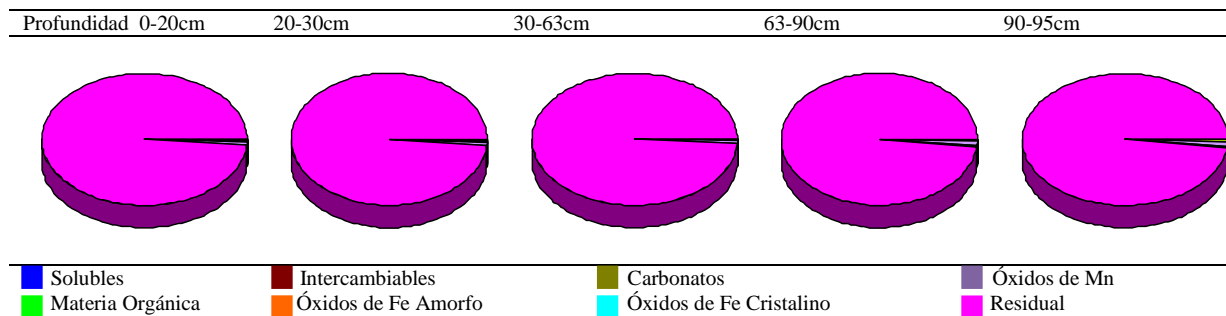


Figura 37 Distribución de % cromo a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo

### **Cobre**

En la figura 38 se observa como el cobre presenta una mayor distribución entre las fracciones analizadas, de manera general y en orden de magnitud se encuentra principalmente en la fracción residual, ligado a materia orgánica, en óxidos de Fe amorfo y de manera intercambiable; se observa que conforme aumenta la profundidad aumenta el porcentaje de cobre ligado a la fracción residual

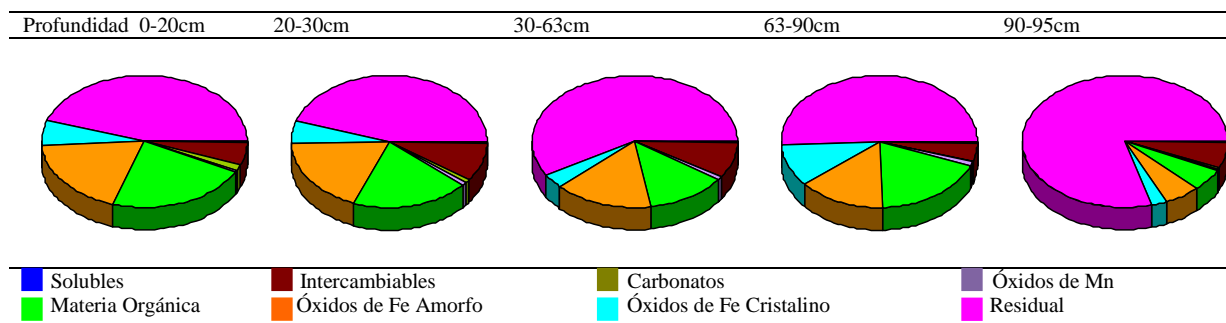


Figura 38. Distribución de % cobre a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo.

### **Zinc**

Los mayores porcentajes del metal se dan principalmente en cuatro fracciones a las que se encuentra ligado y son materia orgánica, óxidos de hierro amorfos, óxidos de hierro cristalinos y la fracción residual.

En la figura 39 se observa que la concentración del zinc ligado a la materia orgánica en la parte superficial es mayor que a profundidad. Los primeros dos horizontes son muy parecidos entre sí. El porcentaje de zinc ligado a la fracción residual aumenta con la profundidad.

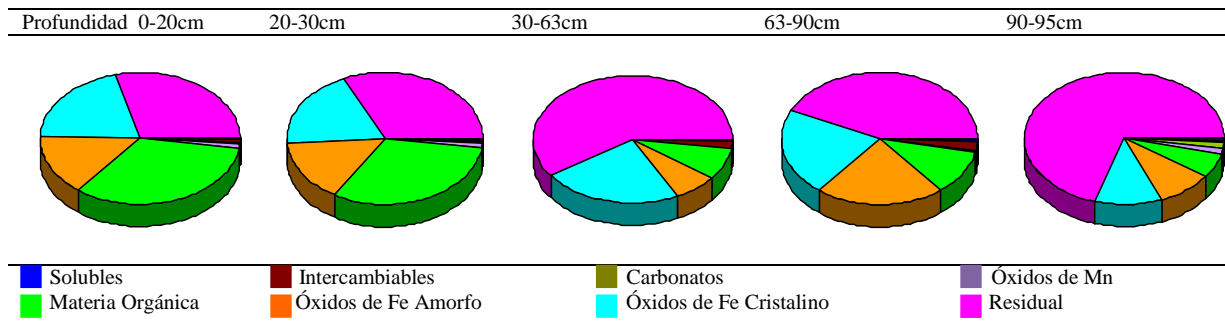


Figura 39 Distribución de % zinc a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo

### ***Manganeso***

En las fracciones en las cuales se encuentra presente la mayor concentración del metal es en la de materia orgánica y la residual.

En la figura 40 se observa que el manganeso ligado a la materia orgánica presenta una mayor concentración en los primeros dos horizontes de 0 a 30 cm de profundidad, a partir de este punto disminuye su porcentaje, en el resto de las fracciones solo se observan porcentajes pequeños menores al 10%.

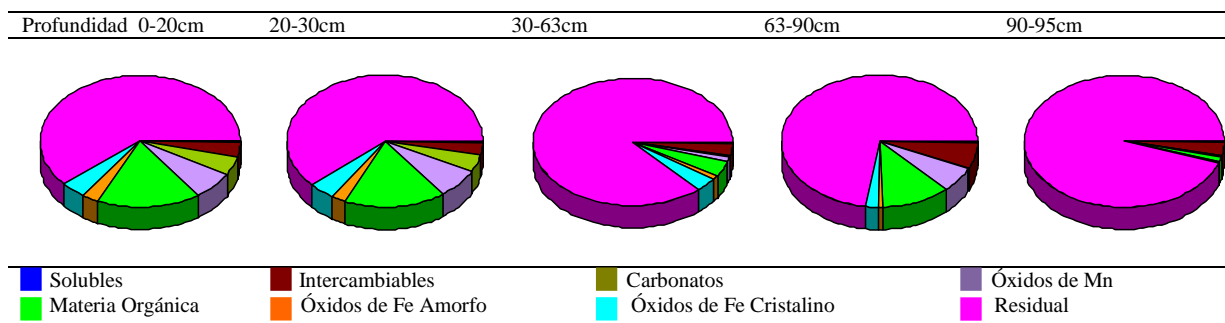


Figura 40. Distribución de % manganeso a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo.

### ***Hierro***

La fracción residual es en donde se registró la mayor concentración del metal y representa el 83%, respecto al resto de las fracciones analizadas. En un porcentaje menor se registró el hierro asociado en óxidos de hierro amorfos y óxidos de Mn (figura 41).

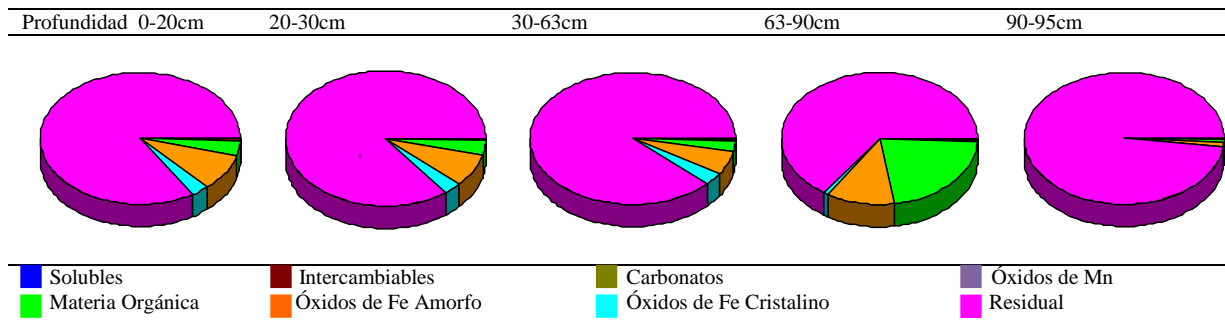


Figura 41 Distribución de % de hierro a lo largo del perfil, ligado a distintas fracciones del suelo.

### 8.6.3 Concentración de metales solubles e intercambiables en muestras superficiales de suelo en secas y lluvias

En la figura 42 se puede ver que en todos los casos hay una mayor concentración de metal de forma intercambiable con respecto a de solubles en las temporadas de lluvia y seca. También se observa que es mayor la concentración de cada fracción en lluvias respecto a lo registrado en secas para el caso del Cu, Cr, Fe, Mn y Zn. En el caso del Cd y el Pb se observa que no hay diferencias al comparar entre ambas temporadas las fracciones correspondientes.

El orden de magnitud de la concentración de metales para la temporada de secas en la fracción soluble es: Fe>Mn>Zn>Pb>Cu=Cr>Cd y en la fracción de metales intercambiables es: Mn>Fe>Zn>Pb>Cu=Cr>Cd. Para la temporada de lluvias en la fracción soluble es: Fe>Mn>Zn>Cu>Pb=Cr>Cd y para la fracción de metales intercambiables se tiene un registro muy similar Mn>Fe>Zn>Cu>Pb>Cr>Cd.

#### **Cadmio**

En secas como en lluvias no hay diferencias  $p \geq 0.05$  si se comparan las fracciones con su contraparte; aunque si se compara la concentración de cadmio soluble con respecto de la fracción intercambiable hay una diferencia significativa  $< 0.0001$  y la fracción intercambiable es 3.5 veces mayor a fracción de cadmio soluble, para ambas temporadas (Figura 42-A).

#### **Plomo**

Al comparar entre temporadas cada una de las fracciones con su contraparte la fracción soluble no presenta diferencias significativas  $p \geq 0.05$ , pero la fracción intercambiable si la hay y es de  $p = 0.0014$  y al comparar entre fracciones tanto solubles como intercambiables se observa que hay una diferencia significativa  $p < 0.0001$  y la concentración es de 2.5 veces mayor en la fracción intercambiable con respecto a la concentración soluble (Figura 42-B).

### ***Cobre***

En temporada de lluvias se registró la mayor concentración del metal, la cual fue diez veces mayor con respecto a la temporada de secas. Al comparar entre las dos diferentes fracciones en la temporada de secas no hay diferencia significativa entre ambas  $p \geq 0.05$  respecto a la temporada de lluvias se tiene que la concentración de cobre intercambiable es casi del doble con respecto a al cobre soluble (Figura 42-C).

### ***Cromo***

Si se compara la concentración del cromo tanto en secas como en lluvias con su fracción correspondiente es dos veces mayor en temporada de lluvias y hay diferencias significativas  $p < 0.0001$ , al comparar la concentración del metal soluble con respecto al intercambiable se presenta una diferencia significativa de  $p = 0.0003$  (Figura 42-D).

### ***Zinc***

La concentración del metal entre las fracción fue mayor en la fracción intercambiable respecto a la fracción soluble en ambas temporadas aproximadamente el doble y se presenta una diferencia significativa de  $p < 0.0001$  y en el mismo sentido, se observan diferencias significativas  $p < 0.0001$  al comparar la fracción soluble respecto a la intercambiable por temporadas y es mayor la concentración de metal registrado en la fracción intercambiable respecto a la soluble (Figura 42-E).

### ***Manganeso***

Al comparar entre temporadas con sus respectivas fracciones no se aprecian diferencias significativas  $p > 0.05$  entre la fracción soluble, en tanto que al comparar la fracción intercambiable tanto en secas como en lluvias, hay diferencia significativa  $p < 0.0001$  y es dos veces mayor en lluvias respecto a secas, si se comparan las fracciones por temporada en secas se observa que la concentración del metal de forma intercambiable es de 15 veces mayor a la concentración soluble, y en el caso de la temporada de lluvias es de 21 veces mayor la concentración del metal de forma intercambiable que soluble en ambos casos las diferencia son significativas  $p < 0.0001$  (Figura 42-F).

### ***Hierro***

La concentración es 3 veces mayor en lluvias que en secas al comparar con su respectiva fracción y presentan una diferencia significativa de  $p < 0.0001$

Al comparar tanto la fracción soluble como la intercambiable en la temporada de secas no hay diferencias significativas  $p \geq 0.05$  en tanto que en lluvias es mayor la concentración del metal en forma intercambiable que soluble y la diferencia si es significativa  $p < 0.0001$  y es del doble de lo registrado en la fracción soluble (Figura 42-G).

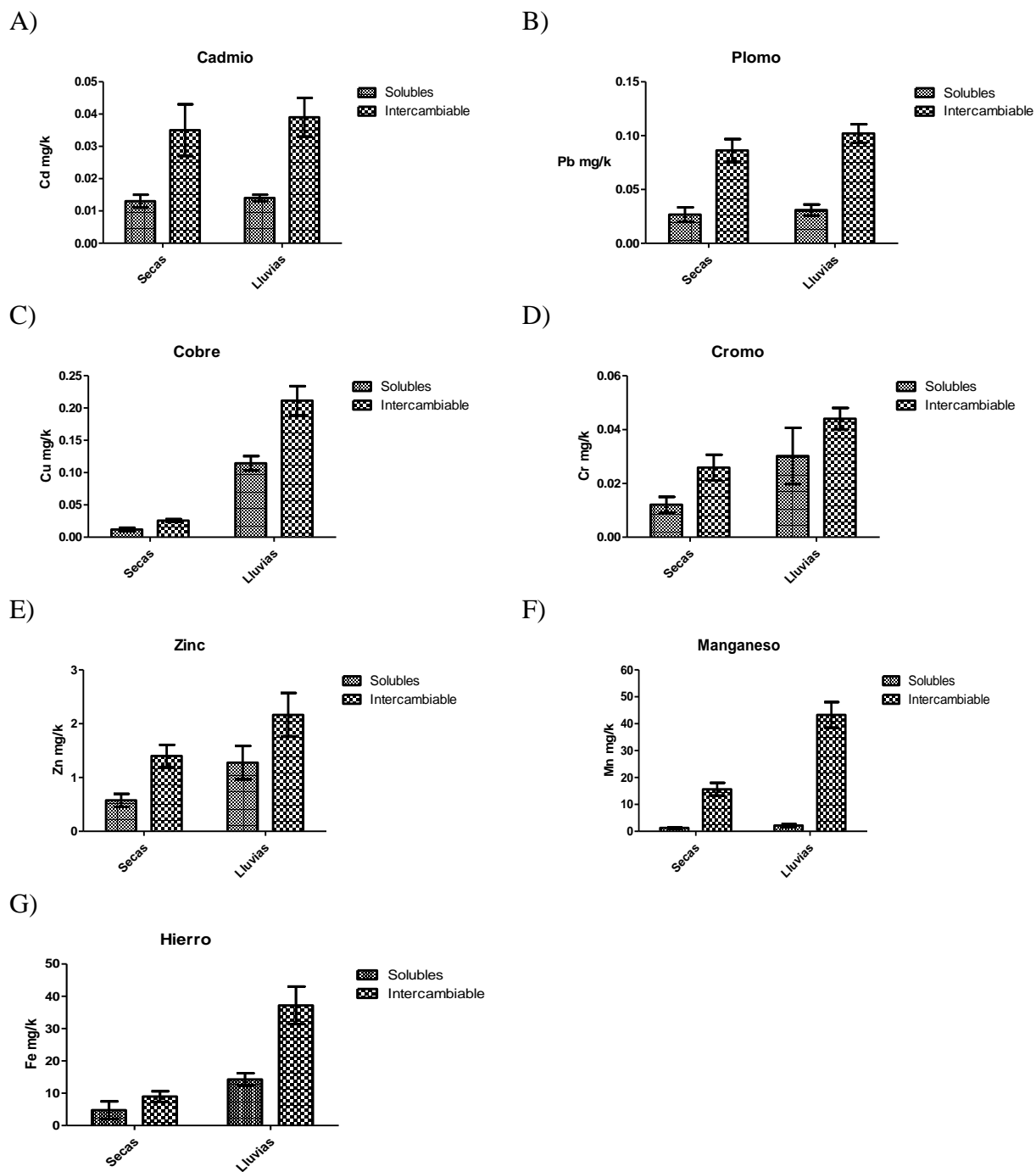


Figura 42. Concentración de metales solubles e intercambiables en temporada de secas y de lluvias. Se muestra un promedio de 9 muestras compuestas y sus desviaciones tomadas durante un ciclo agrícola en cada temporada.

### 8.7 Concentración de metales en tejido de lechuga

De forma general se registró que la concentración acumulada de metales en la etapa de plántula es menor con respecto a la etapa de juvenil y adulta para todos los metales, y que la concentración registrada entre la etapa de juvenil y adulta son muy similares entre sí. También se observa que existe una mayor concentración de los metales en la raíz en comparación con las hojas y también se presenta en la temporada de secas un mayor grado de acumulación del metal respecto a la temporada de lluvias.

#### *Cadmio*

En temporada de secas se aprecia en la figura 43 que si hay diferencias en el grado de acumulación al comparar la etapa de plántula con respecto a juvenil y adulto  $p < 0.0001$  tanto en hojas como en raíces y en la temporada de lluvias no se presentan diferencias entre las diferentes etapas tanto en hojas como en raíces.

La concentración de Cd entre órganos fue aproximadamente tres veces mayor en secas que en lluvias al comparar las hojas y raíces entre temporadas; la concentración del metal registrado entre las raíces con respecto a las hojas en secas fue de casi el doble y de 1.5 veces mayor en raíces que en hojas en temporada de lluvias mostrando una diferencia significativa de  $p < 0.0001$  en ambos casos.

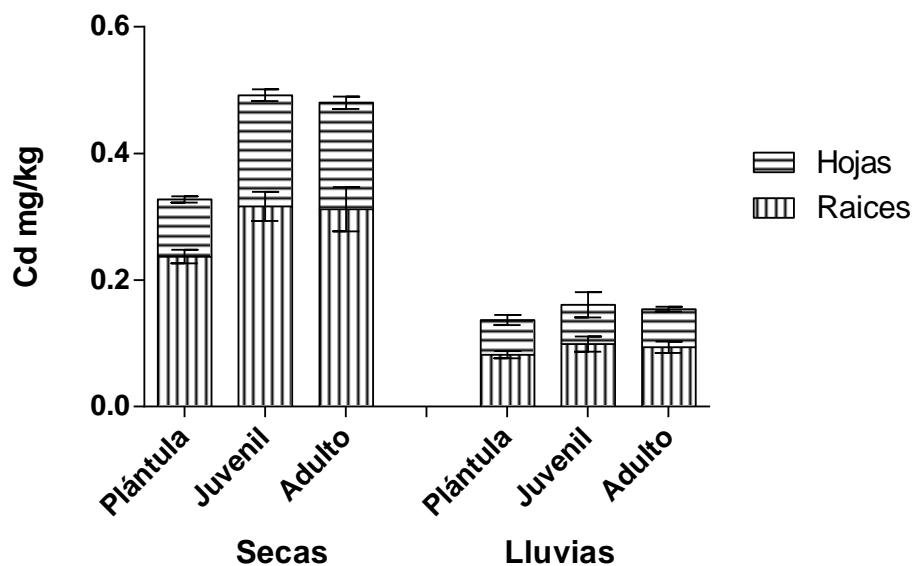


Figura 43. Comparación de la acumulación de cadmio en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante las temporadas de seca y lluvia.



### **Plomo**

El grado de acumulación de Pb en hojas fue mayor en la temporada de lluvias que en secas, En tanto que es en la temporada de secas que las raíces tienen un mayor grado de acumulación con respecto a la temporada de lluvias.

Al comparar el grado de acumulación de las hojas respecto a las raíces se presenta una diferencia significativa de  $p < 0.0001$  en la temporada de secas ya que en temporada de lluvias no hay diferencias entre el grado de acumulación de las hojas con respecto a las raíces.

El grado de acumulación que se da en la temporada de secas se aprecia que la acumulación en la raíz fue casi seis veces mayor con respecto a las hojas. En la temporada de lluvias la concentración de Pb en raíz es muy similar al registrado en hojas (figura 44).

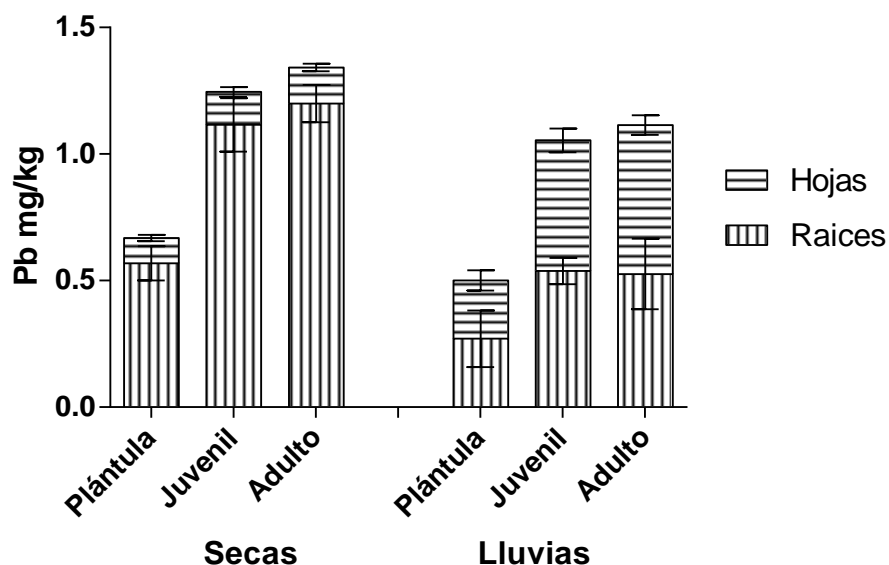


Figura 44. Comparación de la acumulación de plomo en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias.

### **Cromo**

Se aprecia en la figura 45 que la concentración de Cr en hojas es mayor (el doble) en la temporada de lluvias que en la de secas, y la concentración del metal en raíz es mayor (el doble) en secas que en lluvias, también se observa que en la temporada de secas se registró una mayor acumulación en raíces que en hojas y hay diferencias significativas de  $p < 0.0001$  excepto en la etapa de plántula  $p > 0.05$ , en la temporada de lluvias no hay diferencias significativas  $p > 0.05$  entre hojas y raíces y entre estadios.

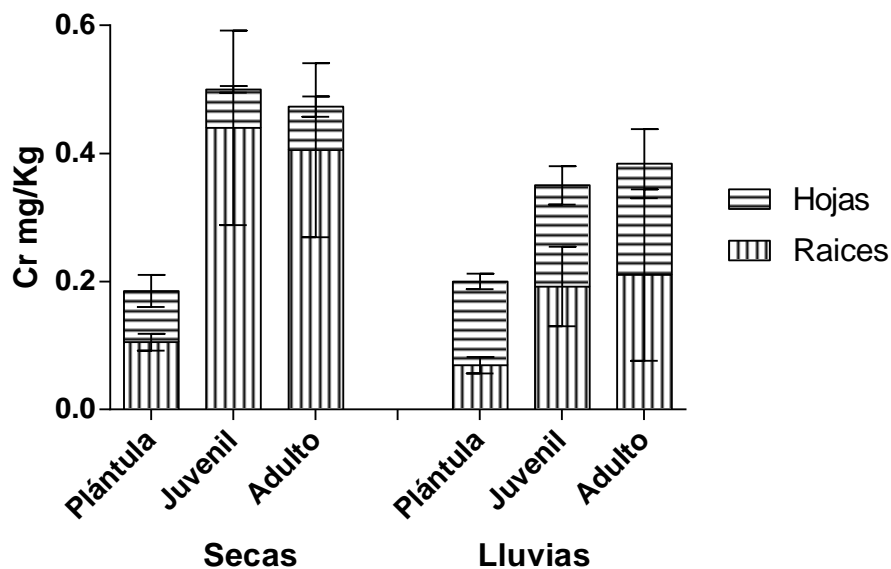


Figura 45 Comparación de la acumulación de cromo en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias

### Cobre

Al compara el grado de acumulación entre hojas y raíces entre temporadas, en la época de secas se presentan diferencias significativas  $p < 0.0001$  de el grado no así en la temporada de secas también se aprecia que hay una diferencia significativa de  $p < 0.0001$  al comparar el grado de acumulación entre hojas del estadio de juvenil y adulto (figura 46).

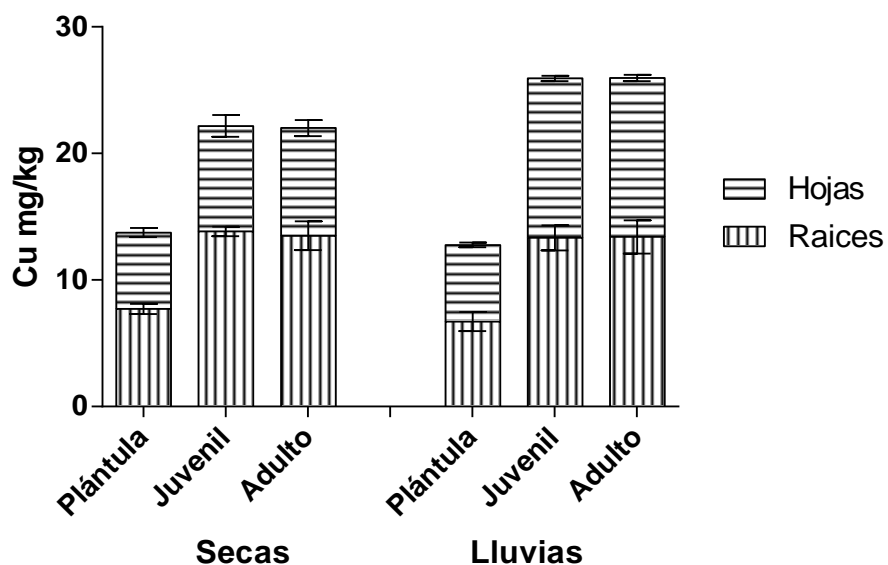


Figura 46. Comparación de la acumulación de cobre en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias.

### Zinc

No hay diferencias significativas  $p > 0.05$  entre el grado de acumulación entre hojas y raíces para ambas temporadas, de igual forma si comparamos entre temporadas el grado de acumulación entre hojas no hay diferencia significativa, lo mismo ocurre para las raíces.

Al comparar entre estadios solo se aprecian diferencias significativas en la época de secas entre plántula y juvenil tanto en hojas como en raíces  $p = 0.02$  y  $p = 0.03$  respectivamente (figura 47).

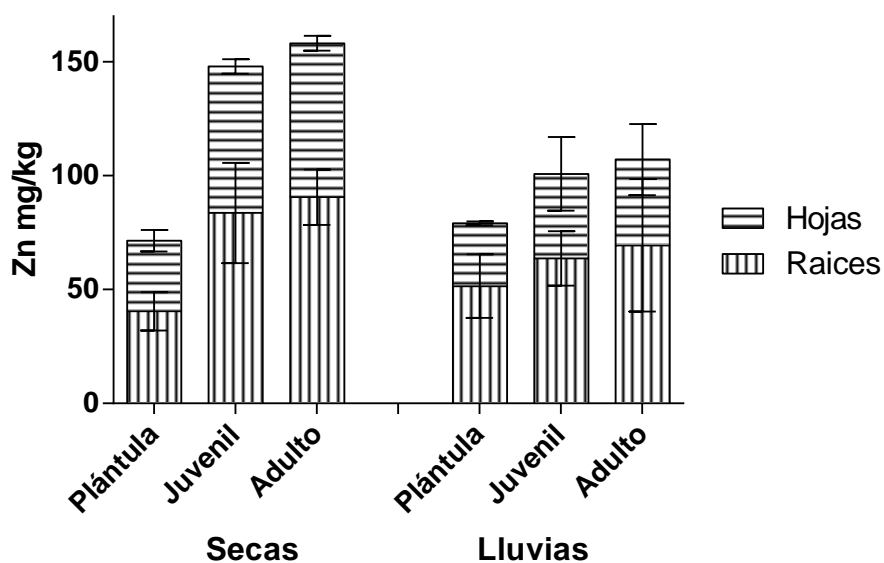


Figura 47. Comparación de la acumulación de zinc en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias.

### Manganeso

Se observa que hay una diferencia significativa  $< 0.0001$  y es mayor grado de acumulación entre las raíces de la temporada de secas con respecto a las raíces en temporada de lluvias. Al comparar la acumulación entre hojas se observa que no hay diferencias significativas  $p > 0.05$  entre épocas. En temporada de secas se observa dos veces mayor concentración en raíces que en hojas y en la temporada de lluvias no hay diferencias significativas  $p > 0.05$  entre órganos (figura 48).

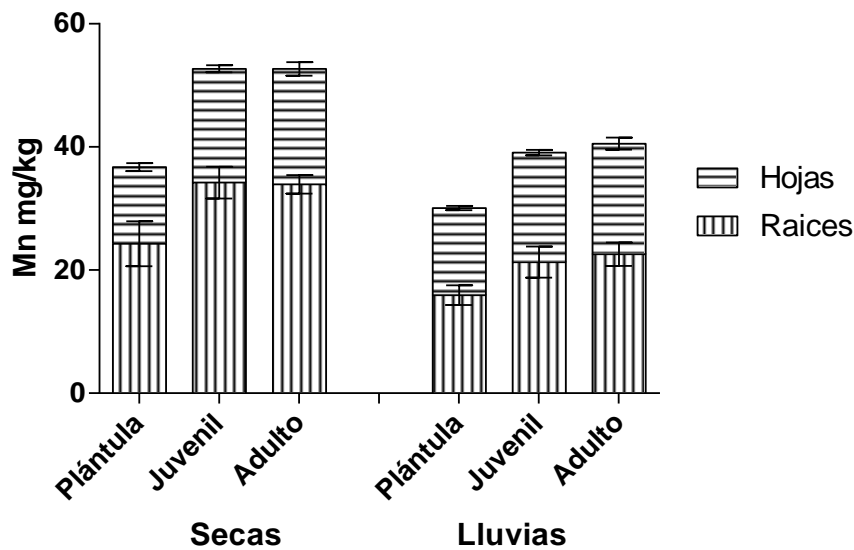


Figura 48. Comparación de la acumulación de manganeso en tejidos en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y la de lluvias.

### Hierro

La acumulación en hojas es menor en secas que en lluvias, pero las raíces presentan una mayor acumulación en la temporada de secas que en la de lluvias.

Se observa que en la temporada de lluvias no hay diferencia significativa  $p > 0.05$  en la etapa de juvenil y adulto, no así en la etapa de plántula  $p < 0.0001$  y en la temporada de secas en donde el grado de acumulación que presentan las raíces es tres veces mayor a la acumulada en hojas  $p < 0.0001$  (figura 49).

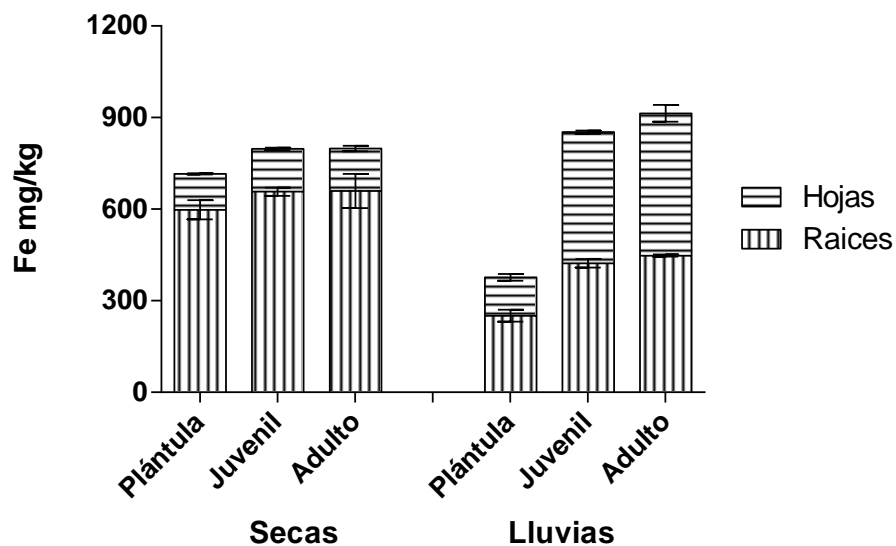


Figura 49. Comparación de la acumulación de hierro en tejidos (hojas y raíz) en 3 etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias.

### 8.7.1 Biomasa registrada de las lechugas

Se puede apreciar en las figuras 50, 51 y 52, que en la etapa de plántula para ambas temporadas no hay diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en su peso, y que posteriormente en las etapas siguientes hay un aumento de masa considerable, en ambas temporadas.

En la temporada de lluvias las plantas presentan un mayor tamaño con respecto a la temporada de secas y también se puede apreciar que la biomasa aérea es mayor que la producida en raíz.

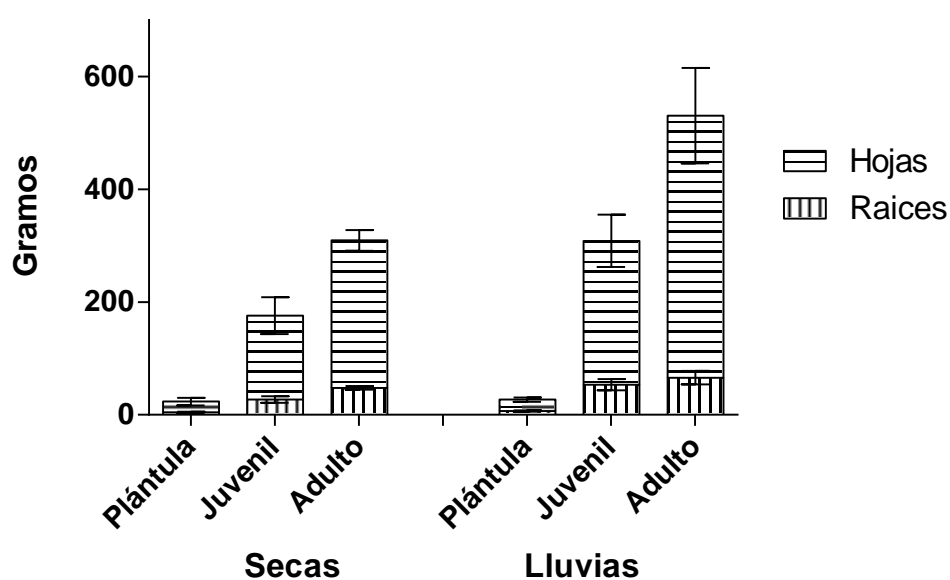


Figura 50. Comparación del peso fresco registrados en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas y lluvias.



Figura 51. Comparación de tallas registradas en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de secas de izquierda a derecha plántula, juvenil y adulto.



Figura 52. Comparación de tallas registradas en las diferentes etapas del ciclo vegetativo durante la temporada de lluvias de izquierda a derecha plántula, juvenil y adulto

### 8.7.2 Incorporación de metales registrados en cultivo de lechuga.

En base a las concentraciones de metales registradas y los pesos de los organismos (peso seco) se determinó la concentración de metal por organismo para cada época, se multiplicó la concentración del metal por la biomasa, tanto para hojas como para raíces y posteriormente se sumaron (hay que tener en cuenta que este organismo presenta una mayor cantidad de hojas y son más abundantes en temporada de lluvias y menor cantidad de raíces), por lo que el orden de magnitud de metal registrado por organismo se da de la siguiente manera en secas es  $Fe > Zn > Mn > Cu > Pb > Cd > Cr$  y en temporada de lluvias es:  $Fe > Zn > Mn > Cu > Pb > Cr > Cd$ . En ambas temporadas se presenta un orden muy similar, a excepción de que se invierte el orden entre Cr y Cd. Las tablas con los valores registrados se pueden ver en anexos 9

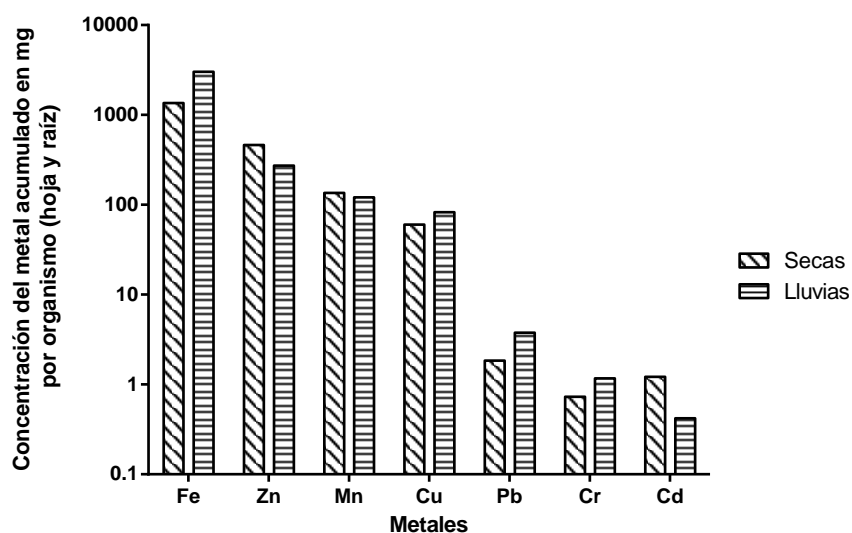


Figura 53 orden de magnitud de acumulación de metales por organismo adulto (acumulación en hojas y raíces) n= 10 por temporada.

## 9. DISCUSIÓN

### 9.1 Características del suelo

El suelo de la chinampa se clasifica como un Antrosol térrico flúvico (WRB, 2006), porque se ha construido de manera artificial por superposición de diversos materiales (plantas, sedimentos lacustres, abonos) que se adicionan continuamente y forman el denominado horizonte térrico y se reconoce por la estratificación que muestran los horizontes en sus contenidos variables de arcillas, limos y arenas y de materia orgánica (figuras 13, 14 y 15) a lo largo del perfil. La variación de la D.R. demuestra que son materiales de fuentes diferentes (Krasilnikov *et al.*, 2013).

Coincide con la clasificación dada por Ramos *et al.*, (2011) refiriéndose a que estos suelos son producto de una combinación de sedimentos lacustres con una fuerte influencia de materiales piroclásticos y que se caracterizan por presentar varios horizontes relativamente uniformes de color negro a gris oscuro y con altos porcentajes de materia orgánica, la cual aumenta a profundidad, al igual que la arcilla. Fuentes (2001) refiere además, una alta porosidad y una baja densidad aparente, así como un contenido de medio a alto de materia orgánica y alta capacidad de intercambio catiónico con una secuencia de cationes intercambiables:  $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$ , lo cual concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo.

López, (2006) reporta que la clase textural predominante en la zona es franco limosa y que presenta una estructura débilmente desarrollada o bien sin estructura, lo cual coincide con los resultados obtenidos, ya que a partir de los 20 cm de profundidad se encontró una estructura masiva. De acuerdo con Cardarelli (2008) ésta es característica de suelos muy jóvenes, que están en una etapa inicial de desarrollo, pero también se puede tener este tipo de estructura en un sitio de reconstrucción. Esto aplica para el sitio de estudio, ya que las chinampas son suelos jóvenes los cuales están en constante construcción por el aporte de forma continua de sedimentos y otro tipo de materiales.

Las propiedades del suelo en antrosoles suelen ser muy heterogéneas (Schleuß *et al.*, 1998). De acuerdo con Jenny, (1994) y Sharma *et al.*, (2012) las propiedades como la materia orgánica, la estructura del suelo, la tasa de infiltración, la densidad aparente, la capacidad de retención de nutrientes, entre otras propiedades, pueden cambiar a lo largo de meses o años en respuesta al manejo del suelo. Si algo caracteriza a la zona de Xochimilco es que en este sitio converge una diversidad de estrategias en el manejo del suelo; esto es de acuerdo a la experiencia de cada uno de los agricultores, por lo que se pueden encontrar cultivos orgánicos, tradicionales, semi-tecnificados, invernaderos, etc. (Sagarpa, 2013). Por ello no se pueden generalizar para toda la zona de Xochimilco los valores registrados en aquellas propiedades que dependen del manejo del suelo.

El pH varía en la zona de Xochimilco (Arrollo, 2013), dependiendo probablemente de las características del agua de riego ya que, en los suelos superficiales en donde se registró un mayor valor de pH, con respecto a horizontes más profundos, se observó una acumulación de sales. Kumar & Chopra, (2011) llevaron a cabo un estudio sobre cómo afecta el riego con aguas residuales a las propiedades del suelo, por lo que midieron algunos parámetros, entre ellos el pH, antes y después de ser sometidos a tratamiento. Los valores de pH variaron de 8.02 a 8.54 y concluyeron que el pH es afectado por el riego con aguas residuales. Dado lo anterior, se puede decir que, si bien, el pH en la chinampa de estudio es moderadamente alcalino (7.39 a 6.95), la aplicación de aguas residuales puede incrementar su valor a lo largo del tiempo

De acuerdo con Landon, (1984), el contenido de  $C_{org}$  que presenta el sitio de estudio es alto (10%). Este valor es similar a lo reportado por Liu *et al.*, (2006) (9.3 %) en suelos de cultivo agrícola (molisol), quien refiere que este valor es elevado debido al aporte de estiércol, lo que también puede suceder en la chinampa, ya que se aplican cerca de 1.5 ton/ha/año de abono de caballo y paja, con el fin de obtener una buena cosecha. Tal aporte de materia orgánica no es necesario y podría considerarse un exceso, ya que Krull *et al.*, (2004) afirman que 1,2% de  $C_{org}$  es suficiente para alcanzar una máxima productividad.

Se sabe que la materia orgánica juega un papel importante en la productividad del suelo, ya que representa una fuente de nutrientes para las plantas (por ejemplo, N, P, S) (Zech *et al.*, 1997). En la tabla 15 se observa el aporte nutrimental de algunos elementos para el tipo de abono que utiliza el agricultor.

Tabla 15. Aporte de nutrimentos y algunos metales en estiércol de caballo.

% peso seco						mg/kg peso seco		
N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Zn	Cu
1.4	0.4	1.0	1.6	0.6	0.3	200	125	25

Hue & Silva, 2000.

Flavel & Murphy (2006) reportan que la enmienda de paja aporta 16.24% de C y 1.42% de N con una relación C:N de 11.4, estos resultados son congruentes con los valores registrados en este estudio ya que se tiene un relación C:N de  $13.56 \pm 1.2$ , en promedio. Usman (2004) determinó que la adición de residuos orgánicos como lodos de aguas residuales y composta al suelo aumenta los valores de COD. En la chinampa se presenta una mayor concentración a mayor profundidad, que corresponde a la fracción superficial lixiviada que no fue degradada o adsorbida (Sanderman *et al.*, 2008). Las concentraciones de COD están relacionadas con las tasas de descomposición biológica y la liberación de nutrientes asociado de la materia orgánica del suelo (Cook & Allan, 1992).



La CIC está relacionada con lo que llamamos fertilidad del suelo, y es la capacidad que tiene un suelo para retener e intercambiar diferentes elementos minerales. Esta capacidad depende de la textura del suelo y aumenta notablemente con la presencia de materia orgánica por lo que, entre más arcilla y materia orgánica en el suelo, la capacidad de intercambio es mayor (NOM-021-RECNAT-2000). El contenido de arcilla es importante, debido a que estas pequeñas partículas poseen una elevada superficie específica.

Los suelos de las chinampas presentan una alta fertilidad; de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, valores superiores a  $40 \text{ cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$  de CIC se consideran suelos con una muy alta fertilidad. La CIC registrada va de 78 a  $104 \text{ cmol}(+)\text{Kg}^{-1}$  a lo largo del perfil, esto se debe principalmente al tipo de arcilla y que de acuerdo con García *et al.*, (1994), el sitio de estudio presenta un alto contenido de esmectitas.

Para el diagnóstico de suelos afectados por la salinidad también se utiliza el PSI (Porcentaje de Sodio Intercambiable), la conductividad eléctrica (C.E.) y el RAS (Relación de Adsorción de Sodio); se considera que un suelo no presenta problemas de salinidad y sodicidad si presenta valores de  $\text{PSI} < 15\%$ , una  $\text{C.E.} < 4 \text{ dS/cm}$  y un  $\text{pH} < 8.2$  (Otero *et al.*, 2007; Vázquez, 1997). Los resultados del estudio no rebasan estos valores, por lo que se considera que el suelo de la chinampa no presenta aún problemas de salinidad y sodicidad. La C.E. está entre 2.1 y  $4 \text{ dS/m}$  a  $25^\circ\text{C}$  y se podría clasificar como ligeramente salino. Con respecto a la salinidad presente en la chinampa, Bedbabis *et al.*, (2014) indican que regar con agua residual induce la acumulación de Na y Cl en todos los horizontes del suelo, en particular en los horizontes superficiales cerca de las raíces. La acumulación de Na disminuye la tasa de infiltración de agua, debido a la formación de un sello que se debe a la acumulación de sólidos en suspensión, y a la dispersión de arcilla. Por lo que el riego con agua residual requiere de ciertas consideraciones, para evitar posibles problemas de salinización (Pilatti *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2009).

## ***9.2 Características del suelo en temporada de secas y lluvias***

El pH presenta una variación temporal, es más alto en la temporada de secas que en la de lluvias (7.39 y 6.95, respectivamente); se sabe que el riego con aguas residuales conduce a la acumulación de sales en el suelo (Mohammad & Mazahreh, 2003), por lo que la diferencia de pH entre temporadas, en este caso, se puede deber a que en la temporada de secas el agua residual aporta una cantidad importante de sales, las cuales son lavadas por la lluvia.

En el sitio de estudio la aplicación de abono se lleva a cabo en los primeros meses del año, en temporada de secas, que es cuando se registra el valor más alto de COD con respecto a la temporada de lluvias. A este respecto, Zhang *et al.*, (2013) señalan que el contenido de COD aumenta considerablemente con la aplicación de abono. Por otro lado, Hui-lin & Xi-jian, (2000) reportan que la temperatura tiene efectos sobre las concentraciones de COD en la solución del suelo, y está en función de la composición de la comunidad microbiana y su actividad; a mayor temperatura, mayor actividad microbiana. Los valores registrados de

COD en el suelo de la chinampa presentan una variación entre temporadas debido probablemente a las diferencias de temperatura que se presentan entre ambas temporadas, en secas es cuando se presenta una mayor temperatura y la concentración de COD es mayor con respecto a la temporada de lluvias.

Otro factor que puede estar influyendo de manera importante en la concentración y variación del COD es el agua de riego, ya que Sánchez, (2006) refiere que el principal aporte de COD en suelos de cultivos del estado de Hidalgo está dado por el riego con aguas residuales; Aldana, (2016) reporta 162.5 mg C/L de COD en agua del canal de San Gregorio Atlapulco cercano al sitio de estudio, este registro es similar al obtenido en este estudio, por lo que probablemente lo que se está registrando en el sitio se deba al aporte proveniente del agua de los canales, y las diferencias tanto en secas como en lluvias se deba a que el aporte de aguas residuales en la chinampa es mayor en la temporada de secas que en la temporada de lluvias, ya que en este último periodo el agricultor no tiene la necesidad de regar el cultivo.

De acuerdo con Zambrano *et al.*,(2009) existe una alta heterogeneidad espacial en lo que respecta a calidad del agua, ya que en esta zona se realizan muchas actividades humanas (económicas, agrícolas y sociales), también refiere que al comparar las variables a lo largo de dos años éstas no presentan diferencias significativas durante este tiempo y concluye que el sistema es bastante estable y tiene una alta capacidad de resistencia durante periodos prolongados; pero al comparar los datos entre temporada de secas y lluvias, indica que existen marcadas diferencias entre las variables medidas, lo cual coincide con los datos registrados en este estudio, a pesar de que las variables fueron medidas en el suelo se pueden notar diferencias entre ambas temporadas que probablemente dependen de la calidad del agua de riego, en temporada de secas se ocupa el agua del canal próximo a la chinampa y en la temporada de lluvias los cultivos dependen de la precipitación pluvial y no se emplea el agua del canal.

### ***9.3 Efecto del potencial óxido-reducción (redox)***

El Potencial redox es un factor relacionado con la aireación del suelo. De manera general los suelos oxidados (no inundados) presentan valores de Eh altos (> 300 mV) y en ellos el oxígeno (O<sub>2</sub>) es el aceptor de electrones principal en los procesos de respiración del suelo. Cuando se inunda el suelo y el O<sub>2</sub> desaparece de la atmósfera del suelo, entonces el siguiente aceptor de electrones serán los nitratos del suelo (NO<sub>3</sub>), de esta manera, se reducen a nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) (300 a 100 mV). Este proceso se conoce como desnitrificación, que significa una pérdida de nitrógeno, al desaparecer los nitratos del suelo otros pares redox tienen lugar y son elementos como el Mn<sup>4+</sup> Mn<sup>2+</sup> (300 a 100 mV) y el Fe<sup>3+</sup> Fe<sup>2+</sup> (100 a -100mV). Suelos que se encuentran permanentemente sumergidos durante largos períodos de tiempo, pueden alcanzar valores muy negativos, Eh (< - 100 mV) y como resultado, son emitidos del suelo a la atmósfera gases de metano y sulfuro (Taboada, 2003).

El suelo de la chinampa es un suelo oxidado ya que la mayoría de los registros tomados al centro de la parcela y en la orilla cerca al canal “P1” y “P2” a las distintas profundidades que fueron monitoreados se presentaron valores por arriba de los 300 mV a excepción de un par de registros en la época de lluvias, los cuales se encuentra ligeramente abajo de los 300 mV.

De forma general se espera que el horizonte superficial en contacto con el aire tenga mayor aireación, y conforme la profundidad disminuya también baja el nivel de aeración del suelo. Pero de acuerdo con los registros obtenidos para el sitio “P1”, el orden de potencial redox de más aerobio a menos aerobio fue de 60, 40, 10 y 20 cm de profundidad. El menor grado de aeración observado a 20 cm de profundidad, probablemente sea debido a que el agricultor cubre su cultivo con un acolchado plástico (negro por dentro y gris por fuera), que protege al suelo de la erosión, disminuye la evaporación y de esta manera ayuda a conservar la humedad del suelo, y un factor que puede estar influyendo en el registro de valores más aerobios a los 60 cm de profundidad es la cantidad de grietas ya mencionadas anteriormente en la descripción del perfil.

En el caso de “P2” conforme aumenta la profundidad el potencial redox va disminuyendo o se hace menos aerobio. Aquí el orden de la secuencia no se invierte como ocurrió en el “P1” y se ve que el orden de más aerobio al menos aerobio fue 10, 20, 40 y 60 cm de profundidad, y se podría considerar que no existe una alteración como en el caso de “P1”, probablemente esto ocurre debido a que este punto se encontraba al borde de la chinampa y presentaba una cara descubierta (en sentido contrario en donde se ubicaron las puntas de los electrodos) cerca del canal. Cabe mencionar que el nivel de la chinampa con respecto al agua del canal que daba hacia la parcela siempre se encontró por debajo de 1.5 metros de la superficie del sitio.

Se sabe que el agua modifica la distribución de aire en el suelo, y por lo tanto la concentración y difusión de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> (Sánchez *et al.*, 2011); en época de lluvias o después del riego, el suministro de oxígeno empieza a ser limitado en los poros del suelo, llevando al agotamiento del oxígeno rápidamente por las raíces y los microorganismos principalmente; este proceso conduce a la reducción del Eh (Pezeshki & De Laune, 2012), y probablemente debido a este efecto es que hay oscilaciones a lo largo del monitoreo de la parcela, en donde se puede estar viendo reflejado el grado de humedad que presenta.

#### ***9.4 Concentración de metales totales en el suelo***

El orden de magnitud de la presencia de metales (totales) en el suelo es Fe>Mn>Zn>Cr>Cu>Pb>Cd y son similares a los reportados por Ramos *et al.*, (2002) y Murguía, (2008) quienes realizaron análisis de contenidos totales de metales en muestras superficiales en la zona de San Luis Tlaxiátemanco y San Gregorio Atlapulco, respectivamente (figura 54).

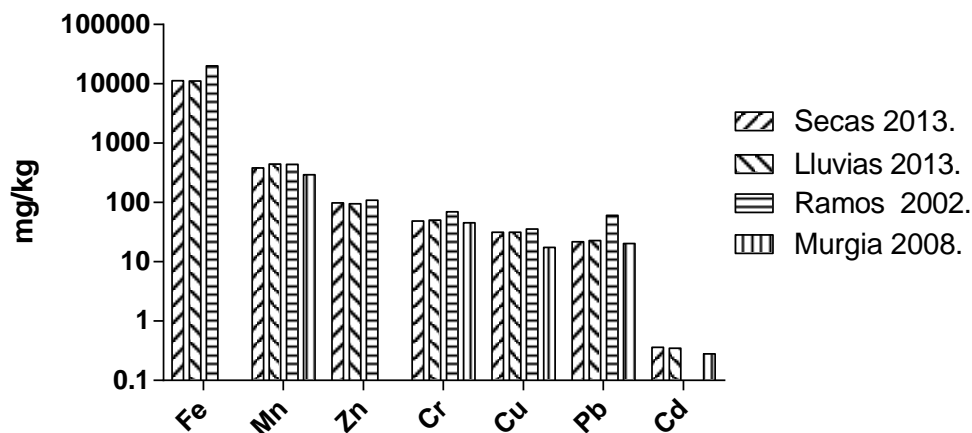


Figura 54. Comparación de la concentración de los metales en suelo superficial en temporadas de secas y lluvias con los valores promedio reportados por diferentes autores Ramos *et al.*, (2002) y Murguía, (2008) quienes han trabajado en la zona de Xochimilco.

Los valores de metales totales en suelo obtenidos para este sitio se encuentran muy por debajo de algunas normas que establecen límites permisibles para suelos contaminados, por ejemplo, las internacionales reportadas por “Canadian Soil Quality” y la legislatura Argentina, así como la normativa mexicana, que llama la atención que establece valores extremadamente altos para elementos como el Cd y el Pb (Tabla 16).

Tabla 16. Comparación de la concentración de metales totales en suelo (mg/kg) de San Gregorio Atlapulco con diferentes normas que establecen límites permisibles de metales en suelos agrícolas.

Elementos	Secas	Lluvias	1)México	2)Argentina	3)Canadá
Cd	0.36+0.04	0.35+0.04	37	3	1.4
Pb	21.76+5.20	22.75+5.37	400	375	70
Cu	31.52+1.78	31.68+1.88	ND	150	63
Cr	48.92+2.45	50.55+1.42	280	750	64
Zn	97.85+20.36	94.82+18.68	ND	600	200
Mn	383.85+37.48	442.92+37.93	ND	ND	ND
Fe	11312+457	11204+437	ND	ND	ND

1) NOM-147 2) Marco legal de Argentina. 3) Canadian Soil Quality Guidelines ND=No disponible

## 9.5 Movilidad de los metales

Respecto a las hipótesis planteada para Cu, Pb y Zn los cuales se espera estén retenidos por la materia orgánica, se empleó un método estadístico de regresión lineal por pasos, el cual nos indica cual es el mejor modelo y cuáles son las variables claves que puedan estar determinado la movilidad de los elementos.

Las principales variables que interviene en la movilidad del Cu en temporada de secas son CIC,PSI y Corg (tabla 17).

Tabla 17. Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del Cu en temporada de secas de acuerdo a los resultados obtenidos de la regresión lineal por pasos

Parámetros Estimados		R <sup>2</sup> =	0.993013	R <sup>2</sup> Adj=	0.98882
Term	Estimado	Error Std	t Razón	Prob> t	Pasos
Intercept	-0.030243	0.002693	-11.23	<.0001*	
Corg	-0.001587	0.000131	-12.08	<.0001*	<b>3</b>
CIC	0.0014491	5.515e-5	26.27	<.0001*	<b>1</b>
PSI	-0.005348	0.000374	-14.28	<.0001*	<b>2</b>

JMP 8.0

En la figura 55 se observa que la materia orgánica está reteniendo a este elemento ya que se presenta una pendiente negativa lo cual nos indica, que a mayor cantidad de materia orgánica menor será la disponibilidad del cobre.

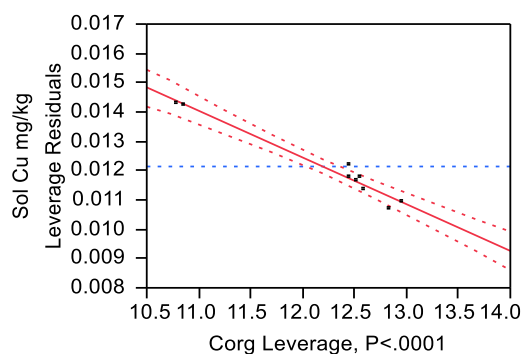


Figura 55. Correlación entre la materia orgánica y el Cu soluble.

En el caso del Pb en temporada de secas las variables que determina su movilidad son el COD, Corg, CIC y PSI (tabla 18).

Tabla 18. Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del Pb en temporada de secas de acuerdo a los resultados obtenidos de la regresión lineal por pasos

Parámetros Estimados		R <sup>2</sup> =	0.954191	R <sup>2</sup> Adj=	0.908381
Term	Estimado	Error Std	t Razón	Prob> t	Pasos
Intercept	0.0321134	0.01888	1.70	0.1642	
COD	0.000561	8.422e-5	6.66	0.0026*	<b>1</b>
Corg	-0.005425	0.001758	-3.09	0.0367*	<b>2</b>
CIC	-0.001014	0.000378	-2.68	0.0551	<b>3</b>
PSI	0.0052092	0.002591	2.01	0.1147	<b>4</b>

En el caso de la disponibilidad del Pb en la temporada de secas, se observa en la figura 56 A que se encuentra ligado al COD y que entre mayor sea la concentración del COD mayor disponibilidad del Pb, en la figura 56 B se aprecia que la materia orgánica está reteniendo al elemento ya que a mayor concentración de Corg menor será la movilidad del Pb.

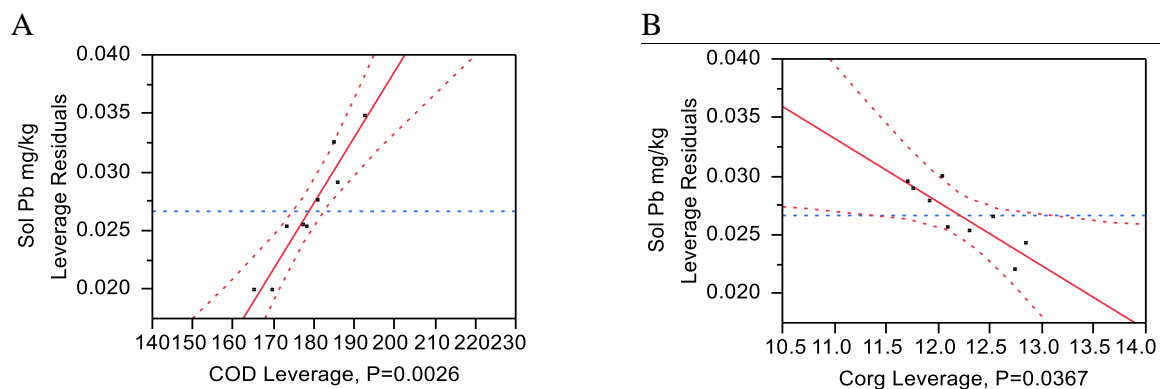


Figura 56. Correlación entre el carbón orgánico disuelto (A) y Corg (B) con respecto al Pb soluble.

En la tabla 19 se observa que los factores importantes en la movilidad del Zn son el pH y el Corg, pero en este caso solo se puede explicar la correlación que presenta con el pH (figura 57).

Tabla 19. Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del Zn en temporada de secas de acuerdo a los resultados obtenidos de la regresión lineal por pasos

Parámetros Estimados		$R^2 =$	0.845168	$R^2$ Adj=	0.793558
Term	Estimado	Error Std	t Razón	Prob> t	Pasos
Intercept	-6.208848	1.921947	-3.23	0.0179*	
pH	0.6019643	0.200455	3.00	0.0239*	2
Corg	0.1912115	0.039245	4.87	0.0028*	1

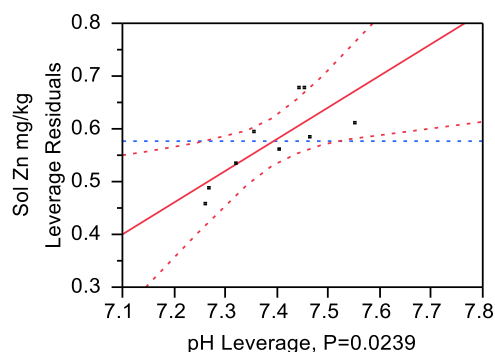


Figura 57. Correlación entre el pH y el Zn soluble.

Respecto a la movilidad del Cu en la temporada de lluvias, en la tabla 20 los tres factores principales son la CIC, pH y el COD.

Tabla 20. Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del Cu en temporada de lluvias de acuerdo a los resultados obtenidos de la regresión lineal por pasos

Parámetros Estimados		R <sup>2</sup> =	0.754724	R <sup>2</sup> Adj=	0.607558
Term	Estimado	Error Std	t Razón	Prob> t	Pasos
Intercept	-0.875375	0.355034	-2.47	0.0568	
pH	0.1000209	0.046266	2.16	0.0830	<b>2</b>
COD	0.000729	0.000387	1.88	0.1185	<b>3</b>
CIC	0.0033889	0.001392	2.43	0.0591	<b>1</b>

En la figura 58 A se observa como a un pH alto o alcalino el Cu presenta una mayor disponibilidad y en la figura 58 B se aprecia que hay una relación positiva, esto es que: a mayor COD mayor movilidad del Cu.

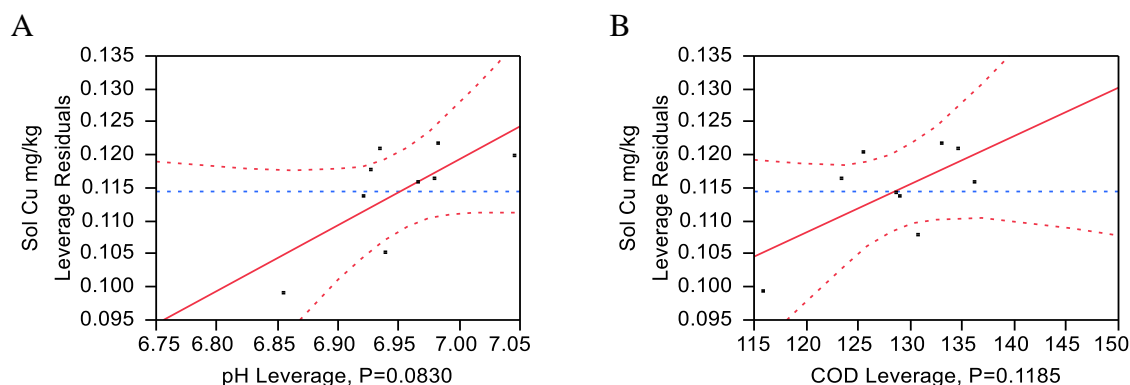


Figura 58. Correlación entre el pH (A) y COD (B) con respecto al Cu soluble.

En la tabla 21 se aprecia que la movilidad del Pb en temporada de lluvias estaría determinada por variables claves como CIC, el pH y el Corg.

Tabla 21. Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del Pb en temporada de lluvias de acuerdo a los resultados obtenidos de la regresión lineal por pasos

Parámetros Estimados		R <sup>2</sup> =	0.878019	R <sup>2</sup> Adj=	0.804831
Term	Estimado	Error Std	t Razón	Prob> t	Pasos
Intercept	0.0456833	0.081776	0.56	0.6005	
pH	-0.019129	0.010597	-1.81	0.1309	<b>2</b>
Corg	0.0003178	0.000735	0.43	0.6837	<b>3</b>
CIC	0.0018893	0.000507	3.73	0.0136*	<b>1</b>

En la figura 59 se aprecia que cuanto menor es el pH mayor movilidad habrá del elemento.

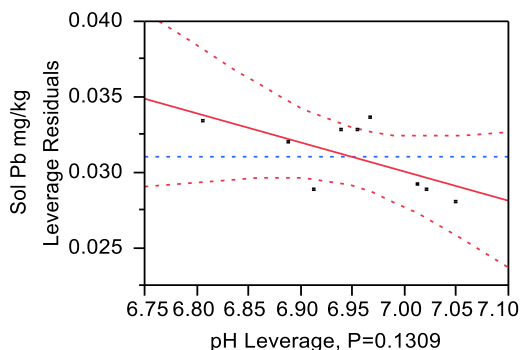


Figura 59. Correlación entre el pH con respecto al Pb soluble.

En el caso de la movilidad del Zn en temporada de lluvias dos son los principales factores que pueden estar determinando su movilidad el pH y el Corg (tabla 22).

Tabla 22. Valores estimados y parámetros relacionados con la disponibilidad del Zn en temporada de lluvias de acuerdo a los resultados obtenidos de la regresión lineal por pasos

Parámetros Estimados		R <sup>2</sup> =	0.725267	R <sup>2</sup> Adj=	0.63369
Term	Estimado	Error Std	t Razon	Prob> t	Pasos
Intercept	27.801652	6.708392	4.14	0.0060*	
pH	-3.517335	0.883884	-3.98	0.0073*	1
Corg	-0.106359	0.050932	-2.09	0.0818	2

En la figura 60 se aprecia que presentan una relación negativa con cada una de las variables, en el caso del pH figura 60 A nos indica que cuanto mas bajo el pH habrá una mayor movilidad y en el caso de Corg figura 60 B se aprecia que cuanto mayor es el contenido de Corg menor es la movilidad del elemento.

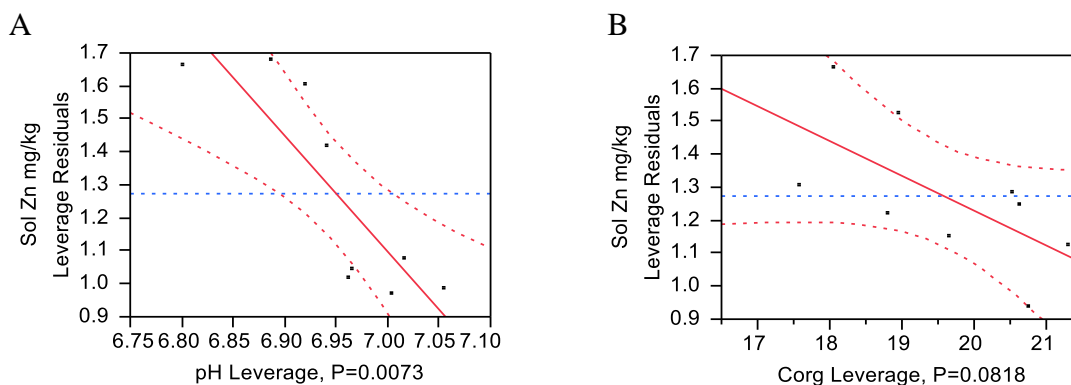


Figura 60. Correlación entre el pH (A) y Corg (B) con respecto al Zn soluble.

Metales como Cu, Pb y Zn se encuentran ligados a la materia orgánica del suelo, por lo que se corrobora la hipótesis inicial (figuras 55 y 56B) se muestra como el Cu y el Pb, en temporada de secas y el Zn, en temporada de lluvias (figura 60B) se encuentran retenidos



por la materia orgánica ya que presentan una relación negativa entre la solubilidad de dichos elementos y la materia orgánica, Sherene, (2010) comenta que la materia orgánica es importante para la retención de los metales en la fase sólida del suelo, lo que disminuye la movilidad y biodisponibilidad.

En la figura 61 se puede observar que los elementos que se encuentran ligados a la materia orgánica con un mayor porcentaje se dan en el orden de magnitud siguiente  $Pb > Zn > Cu$  y de acuerdo con Grimes *et al.*, (1999) quienes determinaron estos metales en suelos con composta de residuos orgánicos, comentan que estos elementos se quedan ligados a la materia orgánica en sustitución del calcio intercambiable de la composta tanto de las sustancias húmicas como no húmicas.

El aumento de la solubilidad de metal a pH bajo es de esperarse debido los procesos de intercambio de cationes que implican al hidrógeno; sin embargo, la solubilidad de metales como el Pb y el Cu se incrementa tanto a pH bajo como alto, es decir, que la curva de solubilidad tiende a forma una U. La aparente asociación de Cu y Pb con COD a pH alto es debido a que tienen una elevada afinidad para formar complejos órgano-metálicos, por lo que cuando aumenta la solubilidad de la materia orgánica, es probable que las concentraciones de estos metales en el suelo aumenten en la solución del suelo, en formas acomplejadas (Ashworth & Alloway, 2000).

De acuerdo a lo anterior y con base en los resultados obtenidos de la regresión lineal se aprecia que hay una mayor solubilidad de Pb en temporada de secas y Cu en temporada de lluvias asociados a COD (figuras 56A y 58B). En la figura 57 y 58A que corresponde a Zn en temporada de secas y Cu en temporada de lluvias, se observa que a un pH alcalino hay una mayor movilidad de los elementos.

El COD tiene la capacidad de formar compuestos órgano-metálicos. Amery *et al.* (2008) refieren que el Cu en la solución del suelo está presente principalmente como un complejo  $Cu_2 + COD$ , y encontraron una correlación positiva entre las concentraciones de Cu y las de COD. Bongiovanni & Lobartini, (2009) determinaron que altas concentraciones de COD evitan la precipitación de los elementos en las raíces y mejora la absorción en las plantas, es decir, hay una mayor movilidad.

La adsorción de los metales puede ser favorecida por los diferentes constituyentes del suelo que incluyen: materia orgánica, arcillas, óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, carbonatos y aluminosilicatos amorfos (Azevedo *et al.*, 2003; McLean & Bledsoe, 1992).

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio mediante la extracción secuencial, se observa (figura 61) que una gran parte de los metales se encuentran ligados a la fracción residual, tal es el caso del Cr, Fe y Mn, pero también se observa que hay un alto porcentaje del metal ligado a la fracción de materia orgánica para Cd, Cu, Mn, Pb y Zn y esto coincide con lo que reportan Ramos *et al.*, (2002) acerca de que existe una alta correlación entre la materia orgánica y el contenido de metales en suelos de Xochimilco. Azevedo *et al.*, (2003) comentan que los óxidos de hierro contribuyen con un alto porcentaje en la retención de metales, lo cual puede verse también en los resultados obtenidos en este estudio (figura 61 Cu Pb y Zn).

García *et al.*, (2005) refieren que determinar la movilidad de los metales mediante el fraccionamiento puede ser un procedimiento analítico simplificado que representa una herramienta útil para determinar la disponibilidad de Zn, Pb y Cd para las plantas. También comentan que los metales intercambiables o ligados a carbonatos, óxidos de Fe y Mn y ligados a la materia orgánica que constituyen una fuente importante de elementos potencialmente disponibles para las plantas. Sus resultados son muy similares a los presentados en este trabajo, ya que se muestra que hay una baja concentración de metales disponibles (solubles e intercambiables), menor al 10% a excepción del Cd.

En general, se puede decir que son bajas las concentraciones encontradas para las fracciones fácilmente disponibles para la mayoría de los elementos analizados, ya que el mayor porcentaje del metal se queda retenido en el resto de las fracciones, lo que determina su poca movilidad en el suelo. En cambio, alrededor del 25% del Cd está ligado principalmente a la fracción intercambiable y asociados a carbonatos y podría estar disponible en función a cambios del pH.

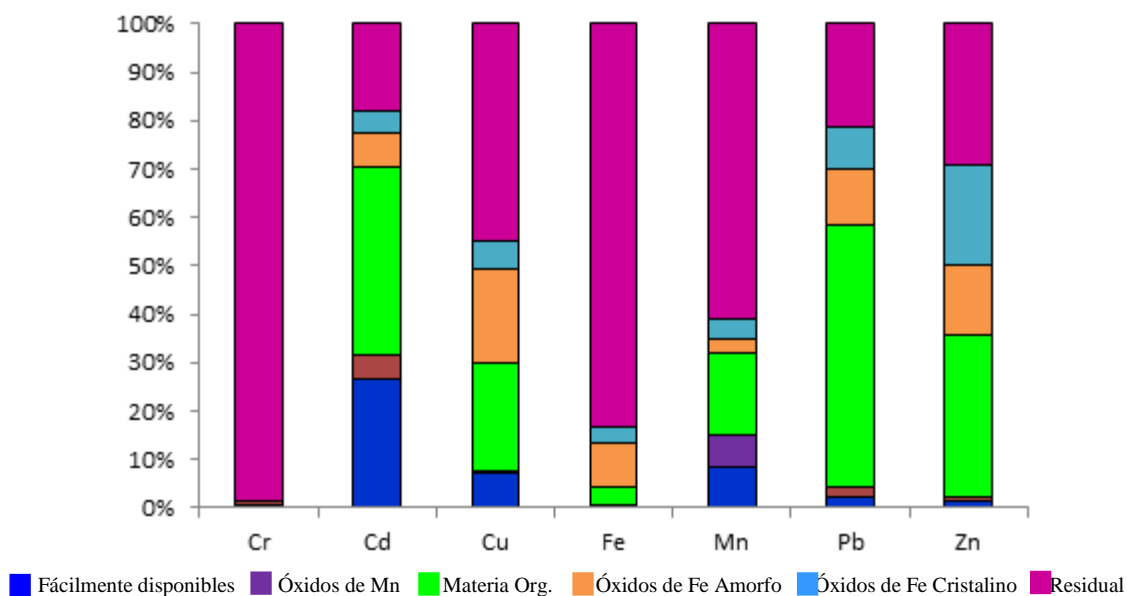


Figura 61. Porcentaje de metales asociados a las diferentes fracciones del suelo en el horizonte superficial (0-20cm de profundidad) para cada uno de los metales analizados. El recuadro de “fácilmente disponibles” comprende las fracciones de solubles, intercambiables y ligados a carbonatos.

El pH del suelo es considerado como uno de los factores más importantes que controla procesos de solubilidad y determinan la concentración de metales en la solución del suelo, su movilidad y su disponibilidad para las plantas. (Naidu & Bolan, 2008),

De manera general cuanto menor es el valor de pH (valores por debajo de 5) el metal presenta una mayor movilidad y se encuentra disponible en la solución del suelo (Sherene, 2010). A pH ácido hay un cierto grado de movilidad y se da de la siguiente manera Cd>

Ni > Zn > Mn > Cu > Pb, esto es que el cadmio presenta una mayor movilidad que el plomo (Fijałkowski *et al.*, 2012). Sin embargo, no todos los metales presentan esa movilidad a pH bajos ya que la excepción son elementos como el As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino ya que tienden a formar hidrox-complejos que pueden incrementar la solubilidad y la movilidad del metal (Sherene, 2010).

De acuerdo con los resultados de la regresión lineal por pasos tenemos que para el Pb y el Zn ambos en temporada de lluvias (figuras 59 y 60A) se presenta una relación negativa con respecto al pH esto significa que cuanto menor sea (pH ácido) mayor será la movilidad de los elementos.

En la figura 62 se representan los resultados de pH sobre un diagrama de disponibilidad de metales en el suelo de acuerdo al pH, en la temporada de secas el valor promedio fue de  $7.39 \pm 0.22$  (línea sólida) y en la de lluvias el valor promedio fue de  $6.95 \pm 0.09$  (línea punteada), por lo que es en la temporada de lluvias es cuando hay una mayor disponibilidad de elementos como el Fe, Cu y Zn.

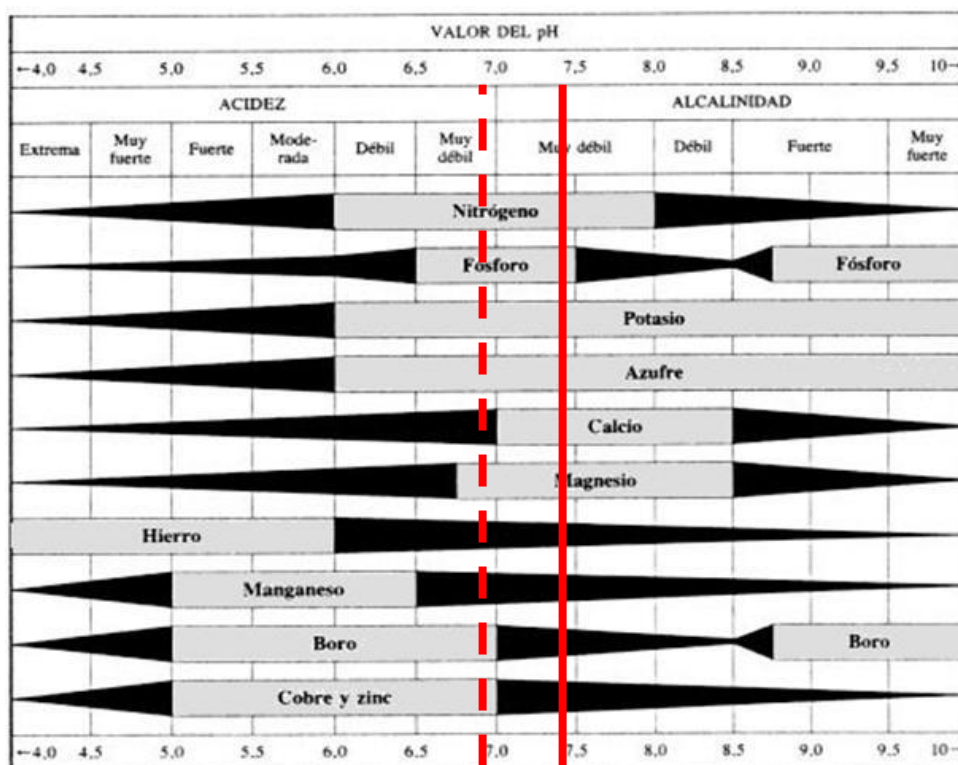


Figura 62. Esquema de “Truog” grado de disponibilidad que presentan algunos metales en función al pH, se comparan los resultados obtenidos en época de lluvias (línea punteada) y en secas (línea continua)

([http://www.ahdb.org.uk/projects/documents/SoilAnalysis\\_000.pdf](http://www.ahdb.org.uk/projects/documents/SoilAnalysis_000.pdf))

De acuerdo con el manual de producción de lechuga de la USAID, (2008) el pH óptimo para los cultivo se encuentra entre 6.0 y 7.0 y se observa en los registros obtenidos que en la temporada de lluvias es cuando los valores caen dentro de este rango, siendo la temporada de lluvias la más favorable para el crecimiento del cultivo.

Respecto a la hipótesis planteada para los elementos como el Mn, Fe y Cr, y con base en los resultados obtenidos de Eh-pH se determina el grado de movilidad que presentan los metales sujetos a óxido reducción (Mn, Fe y Cr) en los diagramas de Pourbaix. En el caso del Mn se puede ver en la figura 63 que se encuentra de forma soluble ( $Mn^{2+}$ ), esta condición aplica tanto para la temporada de secas como de lluvias.

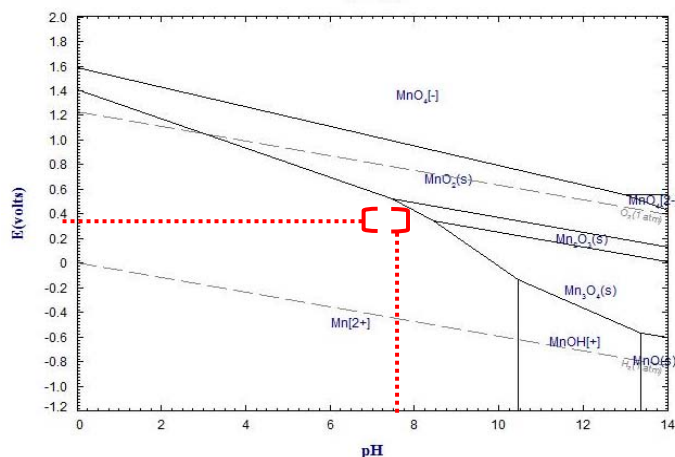


Figura 63. Diagramas de estabilidad Eh-pH (Pourbaix) para Mn. El punto rojo indica los valores obtenidos en este trabajo en épocas de secas y en lluvias <http://www.crct.polymtl.ca/ephweb.php>

El hierro se encuentra en forma de óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ ) y se requiere de condiciones más ácidas ( $pH < 6$ ) y más reductoras (-0.6 a 0.6 V), para que esté disponible como  $Fe^{2+}$ , por lo que este elemento bajo las condiciones actuales en el sitio de estudio presenta poca movilidad (figura 64).

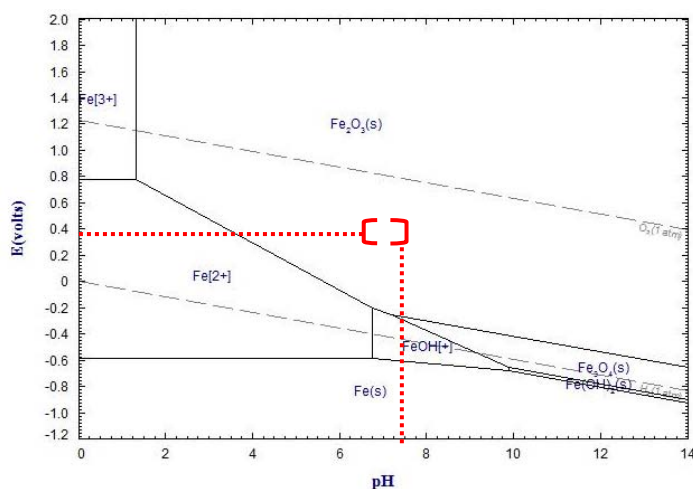


Figura 64. Diagramas de estabilidad Eh-pH (Pourbaix) para Fe. El punto rojo indica los valores obtenidos en este trabajo en épocas de secas y en lluvias. <http://www.crct.polymtl.ca/ephweb.php>

En el caso del cromo, se encuentra en forma de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) y por lo tanto bajo las condiciones actuales determinadas en el sitio de estudio es poco soluble (figura 65).

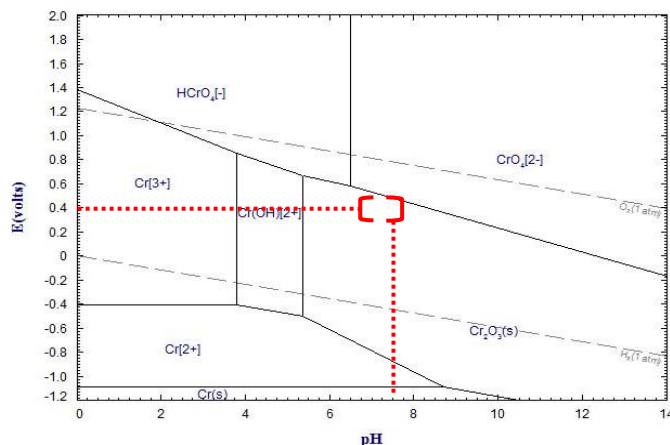


Figura 65. Diagramas de estabilidad Eh-pH (Pourbaix) para Cr. El punto rojo indica los valores obtenidos en este trabajo en épocas de secas y en lluvias <http://www.crct.polymtl.ca/ephweb.php>

Pero no solo los elementos antes mencionados se encuentran sujetos los efectos de las reacciones de oxidación-reducción, ya que Chuan *et al.*, (1996) realizaron un estudio con tres variables de condiciones de pH (3.3, 5.0, 8.0) y tres condiciones de potencial redox (325, 0, -100 mV) y los resultados mostraron que elementos como Pb, Cd, Zn eran escasamente solubles en condiciones alcalinas (pH = 8.0). La solubilidad de los metales fue mayor cuando descendió el pH a condiciones ligeramente ácidas (pH = 5.0) y aumentó drásticamente cuando el pH se mantuvo a 3.3. De igual manera la solubilidad de los metales aumentó a medida que el potencial redox disminuyó. En términos generales, condiciones ácidas y reducidas son favorables para la solubilización de estos elementos, pero determinó que el efecto de pH, fue más significativo que la reducción del potencial redox ya que los metales fueron adsorbidos sobre todo en oxihidróxidos de Fe-Mn. Por lo que la reacción de adsorción de metal dependiente del pH y la disolución de oxihidróxidos de Fe-Mn en condiciones reductoras fue el mecanismo control de la liberación de metales de los suelos.

Con base en los resultados obtenidos por Chuan *et al.*, (1996) se puede esperar que para el sitio de estudio metales como el Pb, Cd, Zn sean poco solubles y esta condición es más notoria en temporada de secas, donde el valor de pH se considera alcalino.

Hu, (2008) menciona que el Ca, Al, Fe, Mn y Mg son los principales iones metálicos que se unen al fósforo inorgánico y reporta que a valores de Eh de 334 mV y un pH de 6.75 la concentración de fósforo disuelto era muy baja al igual que el Mn y Fe, pero conforme el Eh y el pH se volvían más reductores y más ácidos (-5mv y 5.68, respectivamente) la concentración de fósforo disuelto se incrementa igual que la de Mn y Fe. Si se comparan los valores obtenidos en este trabajo del Eh y del pH con los valores reportados por Hu, (2008), se puede esperar que bajo las condiciones actuales en el sitio de estudio, el Ca, Al, Fe, Mn y Mg, presentan poca movilidad. Hu, (2008) reportó estos resultados en suelos con un alto contenido de materiales orgánicos, tales como residuos de plantas o estiércol y

cuyas características son similares a las que se encuentran en el sitio de estudio. Además Braskerud *et al.*, (2005) reportan que el efecto del potencial redox con valores de 400 y 260 mV no es una variable significativa que influye en la pérdida de fósforo en el suelo.

Por lo que a pesar de que en este estudio no se determinó el fósforo disuelto, esto no implica que lo que está reportando Hu, (2008) y Braskerud *et al.*, (2005) no esté ocurriendo en nuestro sitio de estudio y se puede inferir que elementos como el Ca, Al, Fe, Mn y Mg, que pudieran estar ligados al fósforo, serían poco solubles, por lo cual su movilidad en el sistema podría considerarse baja.

La asociación de cloruros era uno de los planteamientos iniciales, principalmente con el Cd ya que la zona de cultivo en torno a los canales de Xochimilco recibe un aporte de sales proveniente del agua de riego como  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  (Cruz, 2010), esta asociación se puede corroborar con los resultados obtenidos en este estudio, en donde la mayor concentración de las sales en los suelos fue en temporada de secas, que es cuándo el agricultor emplea el agua del canal para regar los cultivos. El orden de magnitud en concentración de los aniones en el suelo se dio de la siguiente manera en temporada de secas:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ , en temporada de lluvias solo el  $\text{SO}_4^{2-}$ , es el que destaca ya que los demás aniones presentan una baja concentración. De acuerdo con Ondrasek *et al.*, (2011), al aumentar la salinidad del suelo se incrementa fuertemente la concentración de cloruro disuelto ( $\text{Cl}^-$ ), el cual tiene la capacidad de interactuar con diversos elementos, dando lugar a la formación de diversas especies químicas de un elemento, lo cual influye en la movilidad y absorción de los metales en el suelo ya que los metales asociados al ion cloruro presentan una alta solubilidad (Sherene, 2010). Es de especial interés la posible interacción entre el cloruro y el cadmio para formar el cloruro de cadmio ( $\text{CdCl}_2$ ), el cual facilita la absorción del cadmio por las plantas y otros organismos (Shahnawaz *et al.*, 2012).

De acuerdo a los resultados obtenidos el anión mayoritario tanto en secas como en lluvias fue el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), pero es el cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) el que presenta una mayor constante de formación respecto a los demás aniones analizados (tabla 23) y teóricamente nos da pauta para poder decir que se está dando una mayor formación del cloruro de cadmio ( $\text{CdCl}_2$ ) que el de otras sales

Tabla 23 Constantes de formación o estabilidad para los posibles complejos que puede formar el cadmio.

Compuesto	$\log_{10} K_s$
$\text{CdCl}_2$	2.64
$\text{CdSO}_4$	2.36
$\text{CdHCO}_3$	0.84
$\text{CdNO}_3$	0.50

Powell *et al* (2011)

Un suelo agrícola irrigado con un aporte alto en sales, aun con niveles muy bajos de cadmio, puede ser un riesgo potencial para el consumo de productos, actualmente esto es una tendencia general para muchos cultivos (López-Chuken *et al.*, 2012), ya que las altas concentraciones de Cl<sup>-</sup> afectan a la acumulación de Cd en las plantas. La concentración de cloruro en el suelo juega un papel crítico, ya que puede favorecer la solubilidad y movilidad de Cd dentro de los tejidos en plantas, mediante complejación, lo que da lugar a una especie sin carga, CdCl<sub>2</sub>, que tiene la capacidad de penetrar a través de las membranas Ozkutlu *et al.*, (2007). A este respecto, Kadkhodaie *et al.*, (2012) y Li *et al.*, (1994) reportan un aumento en la concentración de Cd en plantas de girasol y pasto debido a la formación de complejos entre el Cd y el Cl ocasionada por la salinidad.

Con base en lo anterior y en los resultados de la determinación de aniones, se puede decir que en la temporada de secas hay una mayor concentración de cloro en el suelo con respecto a la de lluvias, por lo que la absorción de Cd por las plantas, es mayor en secas que en lluvias, lo cual, se puede corroborar observando el grado de acumulación de cadmio en tejidos entre temporadas en la figura 43, especialmente en la raíz.

En la figura 61 se puede observar que el suelo aún está reteniendo poco más del 70% del Cd, pero este elemento es el que presenta una mayor movilidad respecto al resto de los elementos analizados.

Por la movilidad del Cd en el suelo se esperaría que las plantas presentaran concentraciones elevadas, pero se observa que éstas son bajas (figura 53). Esto se debe probablemente a los exudados radiculares, aunado a la actividad microbiana, ya que se sabe que pueden afectar su absorción, mediante la modificación de las características físicas y químicas de la rizósfera, a través de la producción de agentes quelantes que lo precipitan en el suelo (Dong *et al.*, 2007).

## ***9.6 Incorporación de metales en cultivo de lechuga.***

### ***9.6.1 Factor de transferencia***

El factor de transferencia se define como la relación entre la concentración de un metal en la planta y la concentración **total** del metal en el suelo. Este cociente se usa para evaluar la capacidad de las plantas para absorber los metales del suelo, es también llamado factor de bioconcentración (Yan *et al.*, 2012). Sin embargo, hay que tener en cuenta que los efectos biológicos no están relacionados con la concentración total de un contaminante en el suelo sino con la fracción biodisponible (Harmsen, 2007).

La biodisponibilidad de elementos traza se ha considerado como uno de los problemas cruciales en la agricultura y estudios ambientales (Singh & Kalamdhad, 2013) y es un factor clave para la evaluación de riesgos. Determinar la proporción en la que se encuentra disponible un elemento en un sitio contaminado ayuda a estimar cuánto podría ser absorbido por los organismos presentes. Para ello, se requiere elaborar un procedimiento estandarizado de extracción que permita determinar la concentración de metales disponibles para las plantas durante la temporada de crecimiento y así, mediante el factor de

transferencia, se pueda efectuar una predicción certera sobre si las plantas cultivadas en un sitio dado son aptas para consumo humano o animal. (Chojnacka *et al.*, 2005)

Aubain *et al.*, (2002) reportan un intervalo del factor de transferencia para la lechuga empleando el contenido total de metales en el suelo, pero al comparar estos índices con los calculados en este estudio solo se aproximan el Cr y el Pb. El factor de transferencia reportado por Ponce de León *et al.*, (2010), quienes trabajaron cerca del área de estudio y que registraron contenidos totales de metales parecidos a los nuestros, son cercanos a los obtenidos para el Cd y el Mn; mientras que para el Cu, es similar a lo que reporta Uwah, (2011). Para el Fe y el Zn no se encontró algún reporte similar a lo aquí registrado (tabla 24).

Tabla 24 Comparación del factor de transferencia en lechugas con lo reportado por otros autores.

	<b>Cd</b>	<b>Pb</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>
<b>A</b>	3.0 – 6.0	0.05 – 0.1	0.01 – 0.05	0.3 – 0.5	0.5 – 1.0	ND	ND
<b>B</b>	0.536	0.040	0.035	0.337	ND	0.229	ND
<b>C S1</b>	2.75	1.05	NR	0.95	0.55	0.38	0.79
<b>C S2</b>	2.23	1.64	NR	0.44	0.47	0.37	0.71
<b>Secas*</b>	1.32	0.06	0.01	0.70	1.62	0.14	0.003
<b>Lluvias*</b>	0.43	0.05	0.01	0.82	1.13	0.09	0.003

A) Aubain P.*et al.*, 2002 B) Ponce de León *et al.*, 2010 C) Uwah *et al.*, 2011., \* valores obtenidos para este estudio, ND= Dato No Disponible

El que los índices del factor de transferencia no coincidan con lo que reportan diferentes autores depende de varios factores, como el tipo de suelo y la historia del manejo del mismo, entre muchos otros. En un estudio para evaluar el efecto de tres tipos de suelo diferentes sobre el desarrollo en lechugas (*Lactuca sativa* L. cv. Tizian) expuestos a la misma práctica de gestión agrícola y bajo condiciones ambientales controladas, se observó que existen diferencias en el crecimiento, incluso en ausencia de factores de estrés externos y se concluye que el desarrollo de las plantas estuvo fuertemente influenciado por el tipo de suelo utilizado y las interacciones de las planta con la biomasa microbiana específicas de cada suelo (Neumann *et al.*, 2014)

El grado de acumulación de metales en el tejido vegetal depende de factores como la disponibilidad de los mismos (Fijałkowski *et al.*, 2012), que a su vez depende del pH del suelo, capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica, textura del suelo (Jung, 2008), el tipo de especies o la variedad vegetal juegan un papel importante, así como las interacciones de raíces-microbios, suelo-planta y también influyen de manera importante las prácticas agrícolas como rotación de cultivos y la gestión del agua (Islam *et al.*, 2007).

En la tabla 24 (\*) se puede observar que el factor de transferencia en temporada de secas para la lechuga en este estudio se presentó de la siguiente manera: Zn > Cd > Cu > Mn > Pb > Cr > Fe y en lluvias Zn > Cu > Cd > Mn > Pb > Cr > Fe.



La lechuga tiene una buena capacidad para absorber metales con respecto a otros vegetales como el Zn y el Cu, que son nutrimentos esenciales, pero también elementos tóxicos como el Cd (Shahnawaz *et al.*, 2012). El Cd presenta efectos tóxicos para la mayoría de los organismos, aún a bajas concentraciones (Sarkar *et al.*, 2013). Así mismo, se ha reportado que la lechuga presenta una alta capacidad de bio-acumulación de metales, tanto esenciales como aquellos que no presentan función biológica conocida (Smical *et al.*, 2008).

Los mecanismos de captación celular activos pueden ser altamente selectivos para iones metálicos libres como el Zn y el Cu, pero el transporte pasivo por simple difusión juega un papel aún más importante en la captación de metales como el Cd, ya que este mecanismo no es tan selectivo como el primero (Nowack *et al.*, 2006).

El Cd y el Zn pueden llegar a ser antagónicos y compiten por sitios de unión a nivel molecular, ya que poseen una misma afinidad por los ligandos de azufre, nitrógeno y oxígeno, debido a que ambos pertenecen a la familia IIB, presentan una valencia de  $2^+$  y su configuración electrónica es similar (Aravind & Prasad, 2005), pero debido a esta competencia es que se puede reducir o prevenir el daño potencial a las plantas expuestas al Cd, pues se ha demostrado que el suministro de Zn en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) reduce claramente la acumulación de este metal (Cherif *et al.*, 2011).

Por lo que respecta al Cd y el Zn, y de acuerdo a lo que comentan Cherif *et al.*, (2011), las plantas de lechuga en este sitio probablemente presentan un buen balance entre las concentraciones de zinc y cadmio ya que de lo contrario las plantas estarían absorbiendo una mayor concentración de Cd.

Si se comparan los resultados mostrados en la tabla 24 (fracción disponible en el sistema suelo/planta) con los de la tabla 25 (metales totales en el suelo/planta) se observa que si se emplea la concentración total del metal en suelo se puede subestimar la capacidad que tienen las plantas para acumular metales.

## **9.7 Translocación de los metales**

### **9.7.1 Órganos (Raíz-hojas)**

La captación de nutrimentos es un proceso vital para las plantas, el órgano encargado de esta función son las raíces, las cuales tienen la capacidad de absorber y acumular los nutrientes requeridos para el desarrollo de la planta. Se sabe que a través de la evapotranspiración las plantas tienen la capacidad de movilizar nutrientes del suelo a la raíz y de ahí hasta las hojas (Tanner & Beevers, 2001) incorporando así, tanto elementos esenciales, como elementos sin función biológica conocida (Carginale *et al.*, 2004).

Una vez que los metales son captados por las raíces pueden ser almacenados en éstas o llegar a la parte aérea (hojas y brotes). El transporte de los metales de la raíz a los brotes se da principalmente vía xilema mediante la transpiración y se ha comprobado que ácidos

orgánicos y aminoácidos facilitan y actúan como agentes quelantes en el proceso de translocación del metal (Briat & Lebrun, 1999).

La tolerancia de las plantas a los metales depende en gran medida de la eficiencia de estas en la absorción, el secuestro (principalmente en vacuolas) y el transporte a los tejidos, la translocación es el proceso por el cual las raíces envían a los brotes los iones metálicos absorbidos y el factor de translocación nos indica que tan eficiente es la planta en este proceso (Revathi & Subhashree, 2013) Generalmente las plantas consideradas hiperacumuladoras se caracterizan por presentar una elevada eficiencia en la translocación de metales del sistema radicular a los brotes (Lu *et al.*, 2008).

Tabla 25. Factores de translocación de metales de la raíz a las hojas para cada uno de los estadios en épocas seca y de lluvia.

	<b>Cd</b>	<b>Pb</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>
<b>Secas</b>							
Plántula	0.38	0.18	0.76	0.78	0.77	0.51	0.20
Juvenil	0.56	0.12	0.14	0.60	0.77	0.54	0.21
Adulto	0.54	0.12	0.17	0.63	0.75	0.55	0.21
<b>Lluvias</b>							
Plántula	0.67	0.86	1.90	0.90	0.54	0.89	0.50
Juvenil	0.63	0.96	0.82	0.95	0.58	0.83	1.02
Adulto	0.63	1.12	0.83	0.94	0.54	0.79	1.04

El orden de magnitud se presentó de la siguiente manera, en la temporada de secas fue: Zn>Cu>Mn=Cd>Fe>Cr>Pb, y en la temporada de lluvias fue: Pb>Fe>Cu>Cr>Mn>Cd>Zn

Un factor de translocación con un valor cercano a 1 es indicativo de las altas tasas del transporte de la raíz a los brotes (Mamphiswana *et al.*, 2011). Los resultados muestran que el factor de translocación en la temporada de lluvias para el Pb y el Fe es mayor a 1, probablemente debido a un aporte externo (tabla 25). De manera general, los metales determinados presentan un mayor índice de translocación de las raíces a las hojas durante la temporada de lluvias, con respecto a la de secas, estos datos son consistentes al comparar con la concentración acumulada de metal en hojas (figuras 43-49).

Generalmente la absorción de nutrientes y contaminantes por las plantas se da a través del mecanismo de transferencia suelo-raíz; sin embargo, también puede haber una transferencia directa de los contaminantes de la atmósfera a los brotes (Uzu *et al.*, 2010);

La transferencia foliar de metales y metaloides y su destino en las hojas de las plantas aún no están muy claros, pero la absorción a través de la cutícula y la penetración a través de aberturas estomáticas pueden representar vías importantes para la entrada de metales, contribuyendo de forma importante al enriquecimiento de metales en plantas (Schreck *et al.*, 2012). Probablemente se deba a este efecto de enriquecimiento que las concentraciones de Pb y Fe en hojas presenten un factor de translocación mayor a 1

El transporte de los contaminantes a larga distancia es uno de los principales medios de diseminación de contaminantes provenientes de la quema de combustibles fósiles y que son emitidos a la atmósfera, estos terminan por ser depositados en un lugar distante de donde se generan y en la temporada de lluvias las partículas atmosféricas tienden a precipitar ocasionando que el agua de lluvia presente altas concentraciones de contaminantes (Bangira *et al.*, 2007). A escala global se considera que la deposición atmosférica de contaminantes como el plomo en lluvia representa una fuente importante de contaminantes (Mishra *et al.*, 2012),

Zarazúa-Ortega *et al.*, (2013) evaluaron la deposición atmosférica de metales pesados mediante una planta epífita (cuyo aporte de nutrientes o enriquecimiento de metales no proviene del suelo sino de lo que se encuentra suspendido en la atmósfera) como bio-monitor en sitios urbanos de la zona metropolitana del valle de Toluca y como resultado se registró una alta concentración de metales entre ellos y en primer lugar el Fe con 8207mg/Kg y posteriormente el Pb (59mg/Kg), además comentan que el enriquecimiento de metales en la planta proporciona una evidencia del impacto antropogénico de sectores industriales y zonas urbanas, principalmente por el tráfico vehicular intenso y la quema de combustibles fósiles. En este sentido, y a causa de estos fenómenos antrópicos, Rodríguez-Salazar *et al.*, (2011) determinaron, que hay un aporte de plomo en la capa superficial del suelo urbano de la Ciudad de México (en donde se registraron concentraciones que oscilan entre 15 y 693 mg/kg. de una n=146 Los resultados muestran un enriquecimiento sustancial con una concentración media de 116,3 mg/kg. y el Pb fue el único elemento que se encontró por encima de los valores permitidos y comentan que las concentraciones de Pb observadas están relacionadas con el tráfico vehicular.

Por lo que la transferencia foliar de metales puede ser particularmente importante en sitios agrícolas cercanos a zonas industriales Uzu *et al.*, (2010). El experimento efectuado por este autor consistió en crecer lechugas en invernadero y posteriormente trasladaron un lote en contenedores con suelo no contaminado cerca de una zona industrial controlando el factor de transferencia suelo-raíz. Al comparar las hojas de lechuga cercanas a una zona industrial con respecto al control, después de 43 días de exposición, observaron que el lote experimental presentaban una concentración 67 veces mayor que la contenida en las hojas control, esto lo atribuyen principalmente a la absorción del metal por los brotes o por la transferencia foliar. El caso de este estudio puede ser relevante por la cercanía que presenta el sitio de estudio al núcleo urbano.

### **9.7.2 Estadios (plántula-juvenil-adulto)**

En el ciclo de vida de la planta las etapas iniciales (semillas y plántulas) son muy sensibles al estrés por metales, y de su desarrollo óptimo depende el rendimiento final de cultivos (Smiri *et al.*, 2010). Greger, (2006) comenta que el crecimiento y la tasa de producción de biomasa de la planta son un factor importante que influye en la acumulación de elementos. El incremento en la biomasa de raíces en la etapa adulta puede influir en la absorción debido a la densidad de sitios de captación en el apoplasto del tejido de la raíz. Cuanto mayor sea la biomasa, mayor es la absorción en relación con la concentración. Por otra parte, una gran biomasa aérea puede aumentar la translocación de elementos de la raíz a los

brotos. En plantas maduras la transpiración juega un papel importante en la captación y movilización de los elementos a los distintos órganos; en tanto que en las etapas iniciales es la raíz quien juega un papel más activo en captar los metales que impulsa hacia los brotes. Orroño & Lavado, (2009) comentan que las concentraciones de metales en hojas pueden aumentar con la edad, y esto se puede ver para la mayoría de los casos en las figuras 56 a la 58. A continuación se representa en forma gráfica (figuras 66 a la 69) el análisis de “MANOVA” del contenido de metales en raíz y hoja en los tres estadios vegetativos en época de seca y de lluvia. Se observa en general que existe una mayor concentración del metal en la raíz que en las hojas para todos los metales y esto coincide con lo reportado por Ponce de León *et al.*, (2010) y Orroño & Lavado, (2009), que también reportaron mayor concentración de metales en las raíces. Al comparar entre estadios existe un mayor grado de acumulación del metal en la etapa juvenil y adulta con respecto a la etapa de plántula.

De manera general se aprecia en las figuras 66 a la 69 que en la etapa de plántula hay una menor desviación estándar asociada y, por tanto, sugiere que hay una menor cantidad de rutas metabólicas que estén modulando el acceso de los metales al organismo.

### **Temporada (Secas-lluvias)**

La temperatura juega un papel importante en la acumulación de metales en las plantas, ya que afecta factores fisiológicos como la fotosíntesis y contribuye a la transferencia de metales suelo-planta como lo comprueba un estudio que se realizó utilizando cuatro especies de vegetales (calabaza, col, nabo y col china), en dónde se midió la acumulación de Cd, Pb, Cu y Zn (Yu *et al.*, 2013).

Liao *et al.*, (2006) sometieron plantas de lechuga a diversos tratamientos para obtener alta y baja evapotranspiración y reportan que la concentración de Pb en tejido vegetal es más alta cuanto mayor es la tasa de evapotranspiración con respecto a aquellas plantas, las cuales presentaban una baja tasa de evapotranspiración; Ponce de León *et al.*, (2010) determinaron el grado de acumulación de metales en lechugas bajo diferentes condiciones de luminosidad y concluyen que la tasa de evapotranspiración determina de manera importante la captación y la bio-acumulación de metales en lechugas.

De acuerdo con los datos registrados se tiene que en la temporada de secas es mayor el grado de acumulación de metales con respecto a la temporada de lluvias y esto se puede atribuir a la temperatura ya que en temporada de secas es cuando se registraron las temperaturas más elevadas. En promedio se registró una temperatura de  $18.81\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.66$ ,  $17.31\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.70$  secas y lluvias, respectivamente, lo cual puede estar influyendo de manera directa con la tasa de evapotranspiración, la captación de metales y su bio-acumulación.

En general para cadmio se observa que en la temporada de secas la concentración del metal en hojas es menor que lo acumulado en raíz para los tres estadios vegetativos, se observa que durante la etapa de plántula el grado de acumulación es menor tanto en hojas como en raíz con respecto a la etapa de plántula y adulto, estas dos últimas etapas no presentan diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ) entre sí, por lo que la planta a partir de la etapa juvenil presenta un mismo grado de acumulación de metal con respecto a la etapa adulta.

En la temporada de lluvias se observa que no hay diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ) en el grado de acumulación entre órganos, así como que la acumulación del metal permanece constante durante los tres diferentes estadios vegetativos (figura 66)

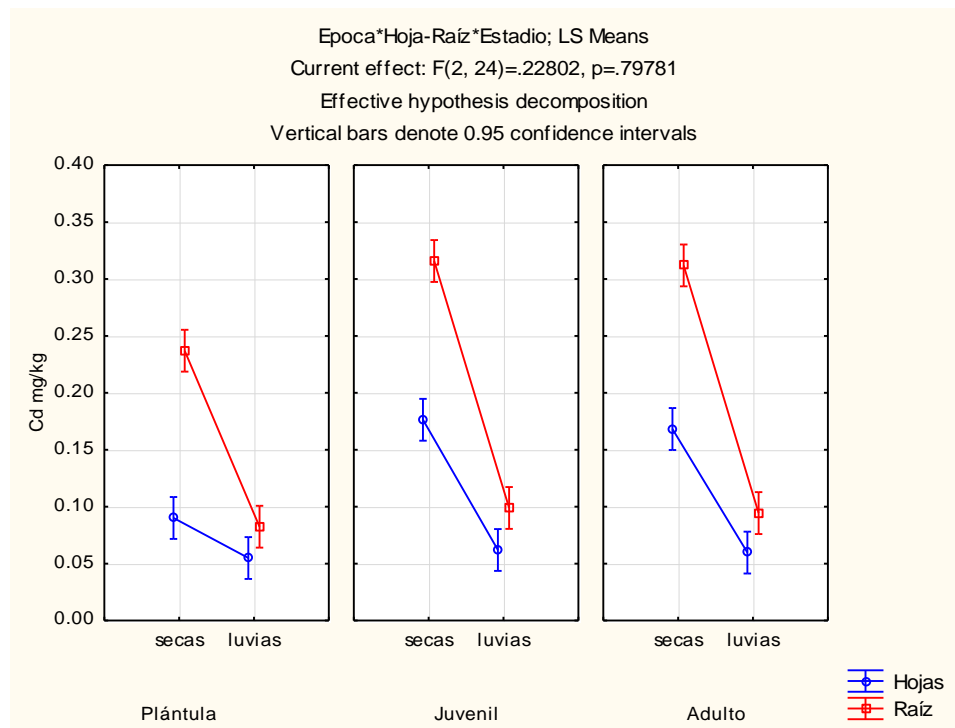


Figura 66. Bio-acumulación de Cd durante las tres etapas de crecimiento de lechugas en temporada de lluvias y secas.

En la figura 67 se observa que la bio-acumulación de Cu y Cr en la etapa de plántula no hay diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ) entre órganos ni entre temporadas, pero en la etapa juvenil y adulto presentan un comportamiento similar entre sí, se observan diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) en la temporada de secas en el grado de acumulación entre órganos y es mayor la concentración del metal en raíces que en hojas, en tanto que en la temporada de lluvias no se aprecien diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ) entre el grado de acumulación entre órganos.

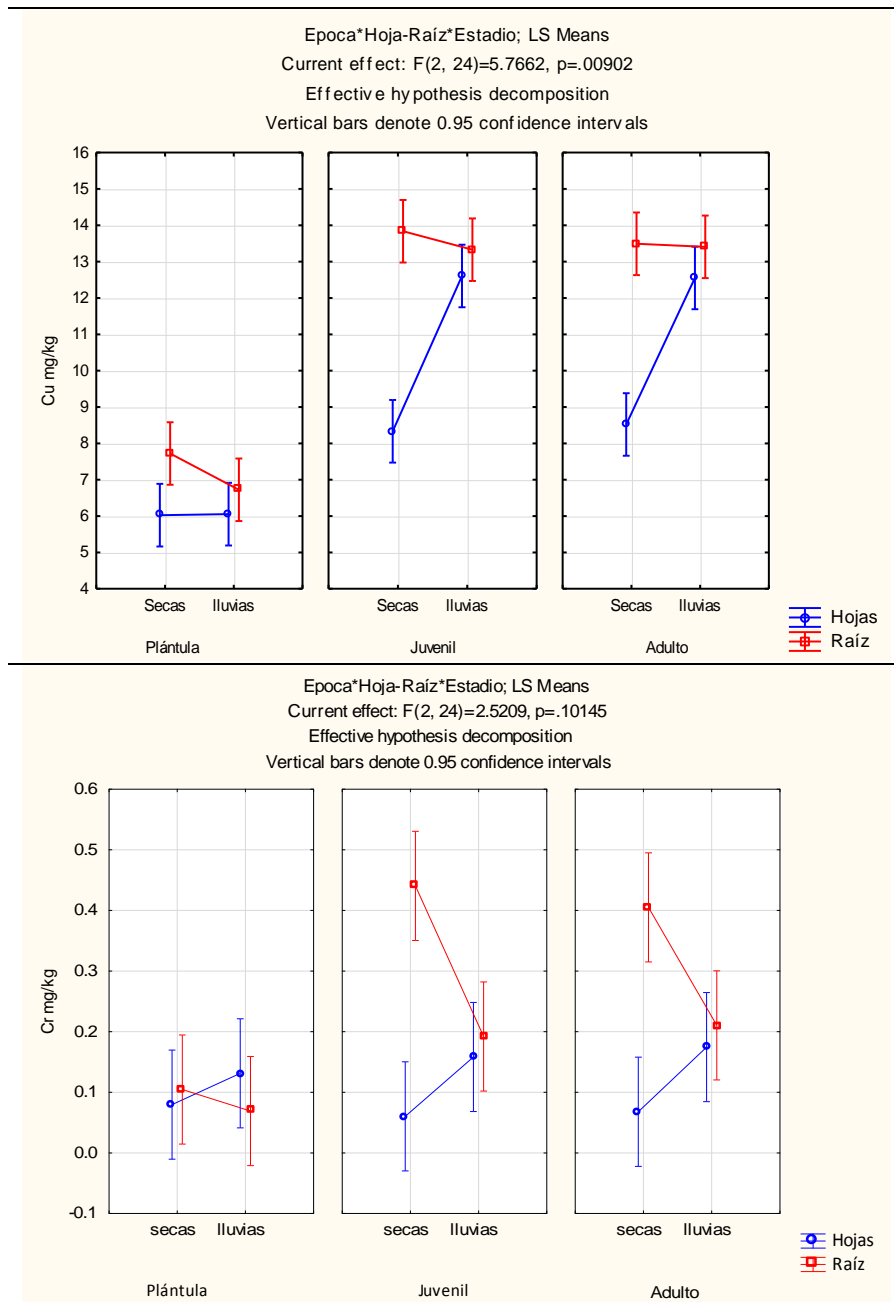


Figura 67. Bio-acumulación de Cu y Cr durante las tres etapas de crecimiento de lechugas en temporada de lluvias y secas.

En el caso de Pb, Mn y Fe se observa un comportamiento similar en los tres estadios vegetativos, en la temporada de secas la acumulación del metal entre órganos es diferente significativamente ( $p \leq 0.05$ ) entre si y hay una mayor acumulación en las raíces que en las hojas, en tanto que en la temporada de lluvias la concentración del metal para los tres estadios vegetativos no se observan diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ) en el grado de acumulación entre órganos a excepción del Fe en la etapa de plántula donde es mayor el grado de acumulación en raíces que en hojas (figura 68).

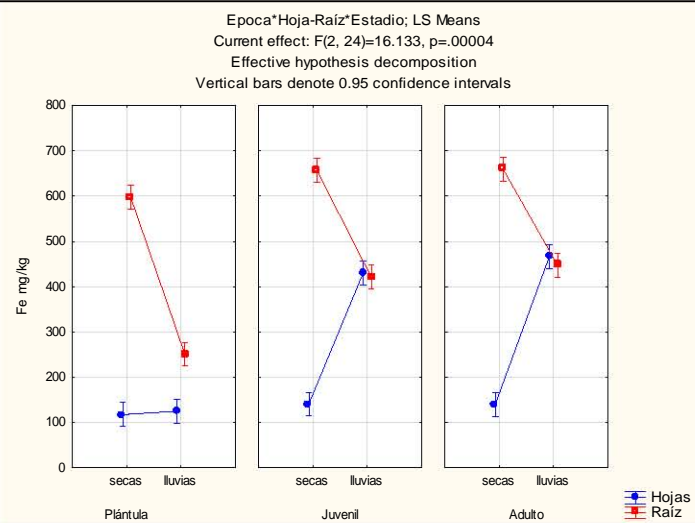
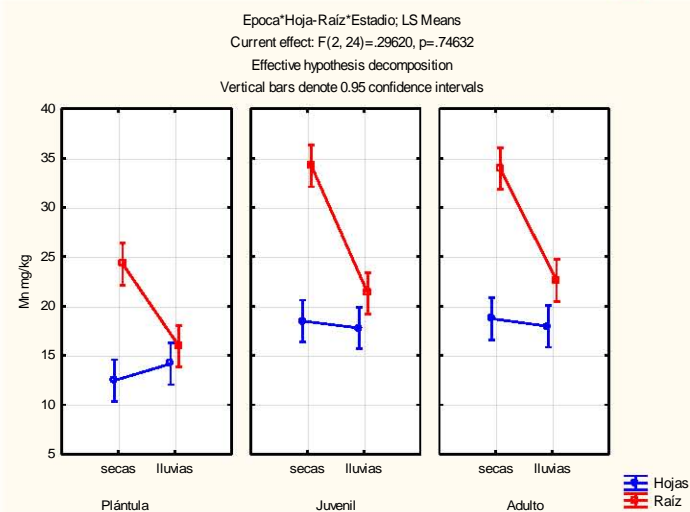
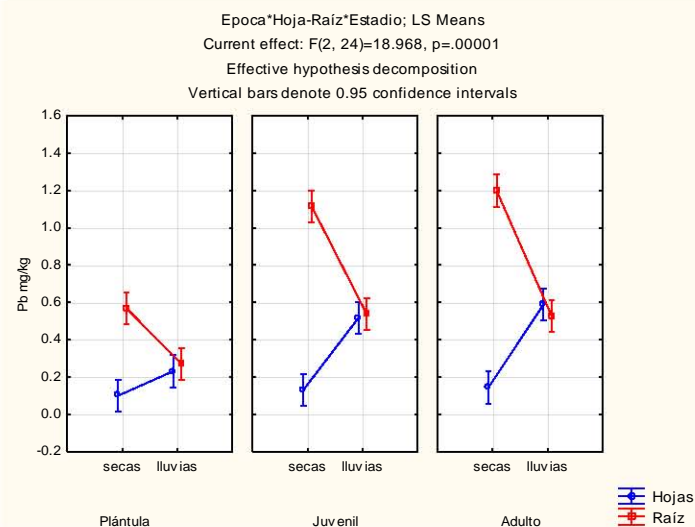


Figura 68. Bio-acumulación de Pb, Mn y Fe durante las tres etapas de crecimiento de lechugas en temporada de lluvias y secas

En el caso del Zn presenta un comportamiento muy diferente al resto de los metales descritos anteriormente ya que entre temporadas tanto secas como de lluvias no se observan diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) en el grado de acumulación entre órganos, e incluso no hay diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ) entre el grado de concentración entre temporadas ni entre etapas (figura 69).

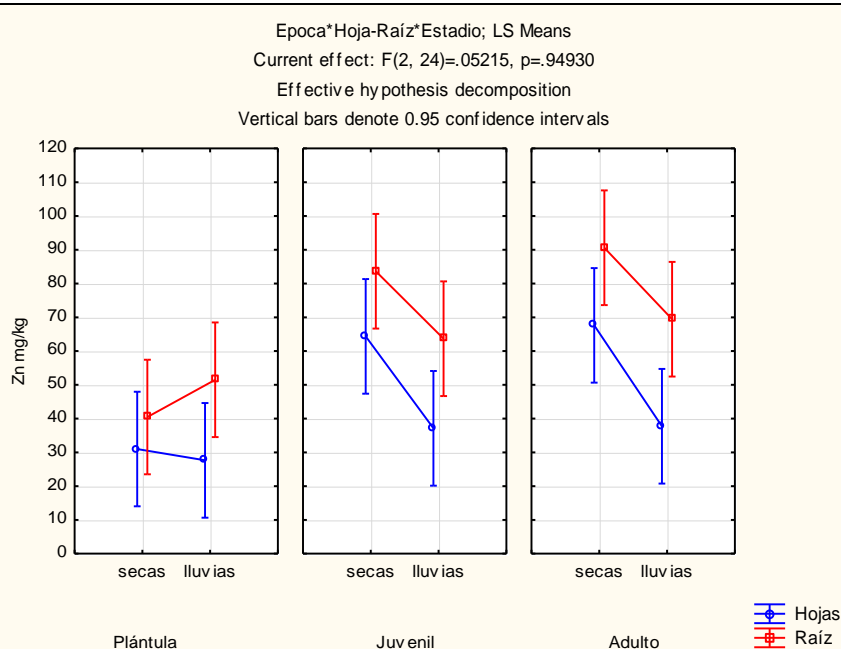


Figura 69. Bio-acumulación de Zn durante las tres etapas de crecimiento de lechugas en temporada de lluvias y secas

De acuerdo con estos resultados, a pesar de que en la temporada de secas se tiene una mayor acumulación del metal en raíz, probablemente por las altas tasas de evapotranspiración (Ponce de León *et al.*, 2010), la tasa de translocación del metal hacia los brotes es menor con respecto a la temporada de lluvias, en donde el grado de acumulación de los metales en raíz es menor y se presenta una alta tasa de translocación a brotes, esto probablemente sea debido a la mayor disponibilidad del metal en suelo, por lo que podríamos suponer que la planta activa los mecanismos de desintoxicación y aumenta el envío de metales a los brotes cuando hay una mayor disponibilidad del metal en suelo.

Si se compra la tasa de evapotranspiración de un cultivo (figura 70) con los resultados obtenidos en el grado de bio-acumulación de metales en tejido vegetal durante los diferentes ciclos vegetativos, se puede apreciar que en la etapa de plántula se presenta un menor grado de acumulación con respecto la etapa de juvenil y adulto en las cuales ambas presentan concentraciones similares entre sí, por lo que esto coincide con los resultados registrados en este estudio y corrobora lo reportado por Ponce de León *et al.*, (2010).



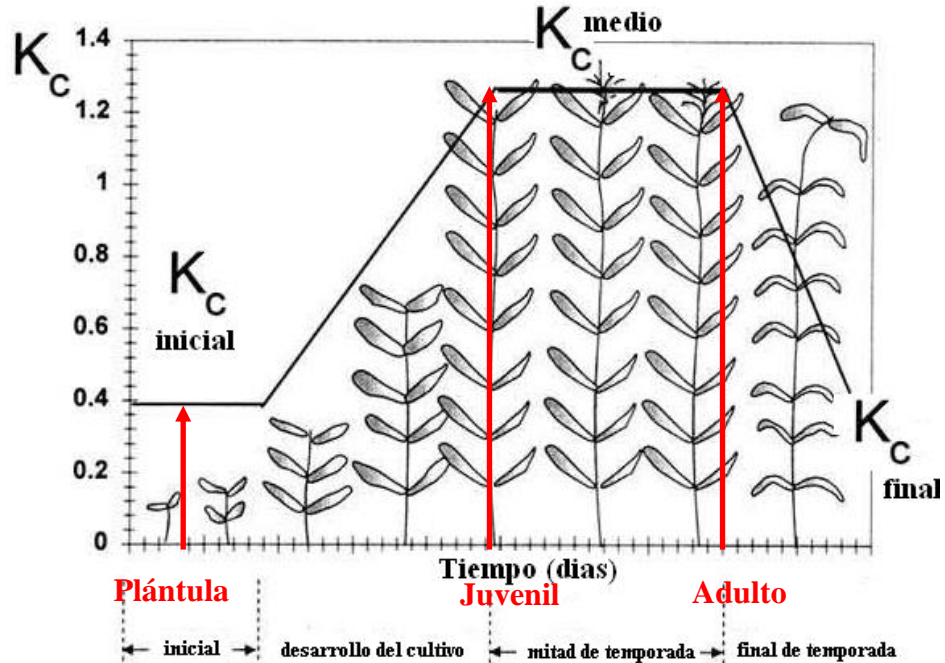


Figura 70. Esquema Desarrollo del ciclo vegetativo de un cultivo y la tasa de evapotranspiración, en donde el K<sub>c</sub> es el coeficiente que integra las diferencias en la tasa de transpiración del suelo y evapotranspiración de los cultivos

[http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e0a.htm#crop evapotranspiration \(etc\)](http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e0a.htm#crop%20evapotranspiration%20(etc))  
<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e0i.jpg>

Las raíces desempeñan un papel importante en la retención de metales mediante la prevención de una acumulación excesiva en los brotes, evitando así los efectos tóxicos en las principales rutas metabólicas, principalmente la fotosíntesis que se lleva a cabo en las hojas (Mazhoudi *et al.*, 1997). Sin embargo, Rascio & Navari-Izzo, (2011), Mamphiswana *et al.*, (2011) comentan que algunas plantas tienen como estrategia de desintoxicación enviar los metales contenidos en la raíz hacia los brotes para disminuir el exceso del metal en la misma, para lo cual, se requiere que los metales se encuentren unidos a proteínas de alto peso molecular como las fitoquelatinas, con lo que disminuye el efecto tóxico (Manara, 2012).

Hsiao & Xu, (2000) quienes trabajaron con plantas de maíz, comentan que las raíces son capaces de crecer un cierto grado bajo un escenario de estrés hídrico, cuando el potencial hídrico se reduce repentinamente la zona de crecimiento radicular ajusta osmóticamente y de inmediato recupera (en cuestión de minutos) la turgencia y establece el gradiente del potencial hídrico para la absorción de agua. Estas regulaciones permiten a la raíz reanudar el crecimiento, aun durante un bajo potencial hídrico. En contraste la hoja, por otro lado, es muy sensible a dicho estrés y bajo la reducción del potencial hídrico de magnitud similar, el ajuste osmótico se produce lentamente, dando lugar a una marcada inhibición del crecimiento y comentan que la acumulación de ácido Abscísico (ABA) bajo estrés hídrico juega un papel fundamental en la inhibición de crecimiento de los brotes.

De acuerdo a lo que comentan Hsiao & Xu, (2000) y con base en los registros obtenidos en este estudio, es probable que las plantas del cultivo en temporada de secas presentan un cierto grado de estrés hídrico a diferencia del cultivo establecido en temporada de lluvias, y se puede ver claramente que la bio-masa registrada por las plantas es más grande con respecto a secas (figura 50), en donde las plantas en temporada de lluvias no dependen del riego intermitente que se presentaba en la temporada de secas, y que se presentaba en lapsos de tres o cuatro días, ya que en temporada de lluvias las plantas recibían un aporte de agua con mayor frecuencia y en mayor abundancia, esto también se puede corroborar con los valores registrados por el potencial redox (figura 28) en donde los valores más bajos se presentaron en temporada de lluvias, esto es que había una mayor humedad en la zona radicular.

Otro dato importante que comentan Hsiao & Xu, (2000), es la acumulación de (ABA) en los organismos bajo estrés hídrico (en este caso las plantas cosechadas en temporada de secas) presenta un mayor grado de acumulación de metales con respecto a la temporada de lluvias (figuras 43 a la 49), pero la mayor concentración del metal se registra en raíces respecto a la acumulación registrada en hojas por lo que el factor de translocación es bajo (tabla 25) y de acuerdo con Perfus-Barbeoch *et al.*, (2002) la acumulación de ABA está relacionado con la baja translocación de cadmio de la raíz-hacia los brotes, de ahí que probablemente las bajas tasas de translocación del metal en la temporada de secas sean menores que en lluvias.

## **9.8 Calidad de lechugas para su consumo**

Cuando las plantas tienen un alto potencial de bioacumulación y se cultivan en suelos contaminados se convierten en una amenaza potencial para la salud humana y animal (Efremova & Izosimova, 2012).

De acuerdo con Mapanda *et al.* (2007), la captación total de metales de una planta no debe asumirse como la tasa de incorporación de metales al organismo, ya que se debe de evaluar únicamente la concentración de metales pesados de las partes que se consumen directamente, en este caso solo serán comparadas la concentración de metales en hoja de los ejemplares adultos con respecto a los límites máximos permisibles (tabla 26). Se aprecia que los metales en la temporada de secas no rebasan los valores máximos permitidos por la FAO/ WHO, e incluso algunos metales como Cr, Cu y Mn se encuentran muy por debajo de los límites máximos permitidos, pero en la temporada de lluvias el panorama cambia, ya que el Pb y el Fe se encuentran por encima de los valores propuestos por la FAO/ WHO, por lo que el consumo de lechuga en temporada de lluvias se debería de evitar.

Tabla 26 Concentraciones o límites máximos permisibles (LMP) mg/kg de metal en vegetales determinados por FAO/ WHO.

<b>Metal</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
Secas	0.17±0.01	0.07±0.02	8.52±0.6	139.11±9.1	18.73±1.1	0.14±0.01	67.61±3.22
Lluvias	0.06±0.01	0.17±0.05	12.56±0.26	<b>466.11±27.12</b>	17.96±0.97	<b>0.59±0.04</b>	37.72±15.62
<b>LMP</b>	<b>0.2</b>	<b>2.3</b>	<b>73.3</b>	<b>425.5</b>	<b>500</b>	<b>0.3</b>	<b>99.4</b>

*Codex alimentarius 2001.*

El que las lechugas presenten estos valores elevados en temporada de lluvias podría deberse a la transferencia foliar de metales y metaloides, la cual se discutió en la sección 9.7 translocación de los metales.

## 10.CONCLUSIONES

- Variables como pH,  $C_{org}$  COD CIC en el suelo presentaron diferencias significativas entre la temporada de secas con respecto a la de lluvias.
- Las condiciones de óxido reducción presentes en el sitio son moderadamente reductoras, y solo favorecen la movilidad del Mn y no así el Fe y el Cr.
- La concentración total de los metales en suelo, tanto en la temporada de secas como en lluvias, siguió el siguiente orden: Fe> Mn>Zn>Cr>Cu>Pb>Cd.
- Con base en las normas nacionales e internacionales se considera que la concentración de metales totales se encuentra por debajo del límite máximo permisible para suelos agrícolas.
- Los metales analizados presentaron una mayor concentración en los horizontes más superficiales, lo cual refleja que el aporte de metales es de origen antrópico.
- La materia orgánica en los horizontes superficiales juega un papel importante ya que retiene una buena parte de los elementos analizados
- En los horizontes más profundos registró que los metales están ligados principalmente a la fracción residual.
- La mayoría de los metales analizados fueron poco disponibles para las plantas ya que están ligados a fracciones como materia orgánica, óxidos de Fe, óxidos de Mn y la fracción residual, a excepción del Cd el cual presentó mayor movilidad respecto a los otros elementos analizados.
- El suelo presenta una alta capacidad de retención de contaminantes por lo que se le puede considerar como sumidero.
- Hay diferencias entre el grado de acumulación del metal de los diferentes estadios de crecimiento de la planta. El menor grado de acumulación del metal se presentó en la etapa de plántula, posteriormente incrementó el nivel de acumulación, y tanto juvenil como adulto presentaron un grado similar de acumulación.
- El principal órgano de acumulación de metales en la lechuga es la raíz y la concentración se registró en el siguiente orden en temporada de secas: Fe > Zn > Mn > Pb > Cu > Cr >Cd y en temporada de lluvias Fe > Zn > Mn Cu > Pb > Cr > Cd.

- El grado de acumulación de metales en la parte comestible (hojas) en la temporada de secas fue el siguiente Fe > Zn > Mn > Cu > Cd > Pb > Cr y en temporada de lluvias fue Fe > Zn > Mn > Cu > Pb > Cr > Cd.
- El factor de translocación indico que el cultivo presentó un posible aporte externo de Fe y Pb lo que incremento la concentración de estos metales en los brotes.
- De acuerdo con el *codex* alimentario, las lechugas cosechadas en época de secas presentaron un nivel bajo de acumulación de metales, sin embargo en época de lluvias se registraron niveles elevados tanto para el Fe como para el Pb los cuales se encuentran por encima de los niveles máximos permisibles.

## 11.BIBLIOGRAFÍA

### A

Ahemad M., Kibret M.. 2014 **Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective** Journal of King Saud University Science 26: 1–20.

Ahmed A., Megawer A., Mansour M, Ashour E., Eissa R., 2011. **Impact of Fulvic Acid and Spirulina Platensis Algae as a Bio Organic Fertilizers for Flame Seedless Grapevines Grown under Sandy Soil** Research Journal of Agriculture and Biological Sciences 7 287-293.

Alatríste G.O. 2005. **Xochimilco Aspectos histórico-culturales** Boletín del CELE-UNAM 7 119-139.

Alcántara O.S. 2001. **Restauración de jardines históricos en México: los jardines flotantes (chinampas) y los jardines formales (Chapultepec)**. Seminario Internacional; Los Jardines Históricos: Aproximación Multidisciplinaria Buenos Aires (Argentina)  
[http://www.international.icomos.org/publications/jardines\\_historicos\\_buenos\\_aires\\_2001/conferencia8.pdf](http://www.international.icomos.org/publications/jardines_historicos_buenos_aires_2001/conferencia8.pdf).

Alcántara O.S. 2005. **The floating gardens in México Xochimilco, world heritage risk site**. City & Time 1: (3) 5

Aldana G.G. 2015 **Influencia de la materia orgánica en la biodisponibilidad de metales en el agua de los canales de Xochimilco** UNAM Facultad de Química Tesis en proceso de publicación.

Alkarkhi A., Ahmad A., Ismail N., Mat Easa A. 2008 **Multivariate analysis of heavy metals concentrations in river estuary**. Environ Monit Assess 143:179–186

Amery F., Degryse F., Cheyns K., De Troyer I., Mertens J.. 2008 **The UV-absorbance of dissolved organic matter predicts the fivefold variation in its affinity for mobilizing Cu in an agricultural soil horizon**. European Journal of Soil Science 59: 1087–1095.

Ángeles-Serrano G., Perevochtchikova M., Carrillo-Rivera J.. 2008. **Posibles controles hidrogeológicos de impacto ambiental por la extracción de agua subterránea en Xochimilco, México**. Journal of Latin American Geography, 7: 39-56.

Angelova V., Ivanov K., 2006 **Effect of chemical forms of lead, cadmium and zinc in polluted soils on their uptake by peanuts**. Geophysical Research Abstracts, 8:01509-01510.

Antoniadis V., McKinley J.D., 2003. **Measuring heavy metal migration rates in a low-permeability soil**. Environmental Chemistry Letters 1:103-106.

Aranda S.M., López M.S. 2004. **Sistema lacustre ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco Distrito Federal Xochimilco**. Comisión Nacional De Áreas Naturales Protegidas  
<http://ramsar.conanp.gob.mx/sitios.php>.

Aravind P., Prasad M.N.V.. 2005 **Cadmium-Zinc interactions in a hydroponic system using Ceratophyllum demersum L.: adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology**. Braz. J. Plant Physiol. 17: 3-20.

Arrollo M.M.. 2013 **Calidad de suelos de humedal de San Gregorio Atlapulco, Xochimilco México, D.F.** UNAM Facultad de Ciencias tesis de licenciatura.

Ashraf M.A., Maah M.J., Yusoff I., 2012. **Chemical speciation and potential mobility of heavymetals in the soil of former tinmining catchment.** The ScientificWorld Journal ID 125608

Ashworth D.J., Alloway B.J., 2008. **Influence of dissolved organic matter on the solubility of heavy metals in sewage-sludge-amended** Soils Communications in Soil Science and Plant Analysis, 39: 538–550.

Aubain, P., Gazzo A., Moux J.L., Mugnier E., Brunet H., Landrea B. 2002 **Disposal and recycling routes for sewage sludge** Part 3 - Scientific and technical report Office for Official Publications Of The European Communities L-2985 Luxembourg  
[http://ec.europa.eu/environment/archives/waste/sludge/pdf/sludge\\_disposal3a.pdf](http://ec.europa.eu/environment/archives/waste/sludge/pdf/sludge_disposal3a.pdf). vistó el 12/2014

Avila S. H. (2004) **La agricultura en las ciudades y su periferia: un enfoque desde la Geografía.** Investigaciones geográficas. 53:98-121

Aweng E.R., Karimah M., Suhaimi O. 2011. **Heavy metals concentration of irrigation water, soils and fruit vegetables in kota bharu area, Kelantan, Malaysia** Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation, 6:4 463-470

Ayres U.R. 1992 **Toxic heavy metals: Materials cycle optimization** Proceedings of the National Academy of Sciences USA 89: 815-820.

Azevedo S.M., Ferracciú A.L., Guimarães G.L. 2003 **Biosolids and heavy metals in soils** Scientia Agricola 60: 793-806.

Azevedo S.M. 2005 **Dissolved organic carbon and bioavailability of n and p as indicators of soil quality** Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.), 62:502-508

## **B**

Bangira C., Manyevere A., Mubvumba P. 2007 **The spatial and temporal variation of ph and lead in rain water in harare city, Zimbabwe** Journal of Sustainable Development in Africa 9:1-19.

Bedbabis S., Rouina B.B., Boukhris M., Ferrara G. 2014 **Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate** Journal of Environmental Management 133:45-50.

Bhat N.U., Khan A.B. 2011 **Heavy metals: an ambiguous category of inorganic contaminants, nutrients and toxins** Research Journal of Environmental Sciences 5:8 682-690

Blum W.E.H., Horak O. Mentler A. Puschenreiter M. 2012 Chapter 3 **Trace Elements Environmental and Ecological Chemistry** Vol II Edited by: Aleksandar Sabljic, Rudjer Boskovic Institute, Croatia. [www.eolss.net/sample-chapters/c06/e6-13-03-04.pdf](http://www.eolss.net/sample-chapters/c06/e6-13-03-04.pdf) vistó 07/2015

Bolan N., Naidu R., Choppala G., Park J., Mora M.L., Budianta D. 2010. **Solute Interactions in Soils in Relation to the Bioavailability and Environmental Remediation of Heavy Metals and Metalloids.** Pedologist 53, 1-18.

Bondada B.R., Qiying L.M.A. 2003. **Tolerance of heavy metals in vascular Plants: Arsenic hyperaccumulation by chinese, brake fern (*Pteris vittata* L.)** Chandra, S. and Srivastava M. (eds.), Pteridology in The New Millennium, Kluwer Academic Publishers, TheNetherlands. 397-420.

Bongiovanni M.D., Lobartini J.C. 2009 **Efecto de sustancias orgánicas solubles del suelo sobre ci.** Suelo (Argentina) 27: 171-176.

Bot A., Benites J. 2005. **The importance of soil organic matter Key to drought-resistant soil and sustained food production** FAO Rome, soils bulletin 80

Bouain N., Kisko M., Rouached A., Dauzat M., Lacombe B., Belgaroui N., Ghnaya T., Davidian J.C., Berthomieu P., Abdelly C., Rouached H. 2014 **Phosphate/zinc interaction analysis in two lettuce varieties reveals contrasting effects on biomass, photosynthesis, and dynamics of pi transport**. BioMed Research International 548254 1-10.

Boyle M., Paul E.A. 1989 **Carbon and Nitrogen Mineralization Kinetics in Soil Previously Amended with Sewage Sludge** Soil Science Society of America Journal 53:99-103.

Braskerud B.C., Hartnik T., Lovstad O. 2005 The effect of the redox-potential on the retention of phosphorus in a small constructed wetland. Water Science and Technology. 51:127-34.

Briat J.F., Lebrun M. 1999 **Plant responses to metal toxicity**. Academie des Sciences/ Life Sciences 322: 43-54.

Brigattia M.F., Galanb E., Theng B.K.G. 2006. **Chapter 2 Structures and mineralogy of clay minerals developments in clay** Science 1: 19–86.

Brown K.H., Jameton A.L., 2000. **Public health implications or urban agriculture**. Journal Public Health Policy 21:20-39.

Bruemmer G.W., Gerth J., Herms U., 1986. **Heavy metal species, mobility and availability in soils**. Z. Pflanzenernaehr Bodenk 149: 382-398  
Burden & Sims 1999,

Burden D., Sims J., 1999. **Fundamentals of soil science as applicable to management of hazardous wastes** US EPA, Washington, DC, EPA/540/S-98/500

## C

Canadian Soil Quality Guidelines (CSQG), (2007). **Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Summary tables**. Updated September, 2007. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, by Canadian Council of Ministers of the Environment.(CCME) [http://www.esdat.net/Environmental%20Standards/Canada/SOIL/rev\\_soil\\_summary\\_tbl\\_7.0\\_e.pdf](http://www.esdat.net/Environmental%20Standards/Canada/SOIL/rev_soil_summary_tbl_7.0_e.pdf) visto 08/2015

Campana L., Selloni A., Weber J., Goursot A., 1995. **Structure and stability of zeolite offretite under Si<sup>4+</sup>/(Al<sup>3+</sup>, M<sup>+</sup>) Substitution (M = Na, K): A first principles molecular dynamics study**. Journal Physic Chemistry. 99: 16351–16356

Cardarelli F. 2008 **Materials**. Handbook. A Concise Desktop Reference. 2nd Edition Springer-Verlag London.

Carginale V., Sorbo S., Capasso C., Trinchella F., Cafiero G., and Basile A., 2004 **Accumulation, localisation, and toxic effects of cadmium in the liverwort *Lunularia cruciata*** Protoplasma 223: 53–61

Carr R., 2005. **Who guidelines for safe wastewater use - more than just numbers**. Irrigation and Drainage. 54: S103–S111. doi: 10.1002/ird.190

Chanduvi F.1993 **Riego con aguas servidas en Xochimilco, México DF** Informes sobre Temas Hidricos FAO, Rome (Italy). Direccion de Fomento de Tierras y Aguas; p139-150

Chang C., Wang M., Huang C., Sessaiah K., 2007. **Characterization of humic substances derived from swine manure-based compost and correlation of their characteristics with reactivities with heavy metals** Journal of Agricultural and Food Chemistry 55: 4820-4827.



Chen M., Ma L.Q., Hornsby A.G., Harris W.G. 1999. **Background Concentrations of Trace Metals in Florida Surface Soils: Taxonomic and Geographic Distributions of Total –Total and Total Recoverable Concentrations of Selected Trace Metals.** Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management. Report 99-7

Cherif J., Mediouni C., Ben Ammar W., Jemal F.. 2011 **Interactions of zinc and cadmium toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (*Solanum lycopersicum*).** J Environ Sci (China). 23:837-44.

Chhibber S., Sharma N. 2014 **A Review on Impact of Heavy Metal Toxicity on Environment** 3:530-541

Chojnacka K., Chojnacki A., Górecka H., Górecki H. 2005 **Bioavailability of heavy metals from polluted soils to plants** Science of the Total Environment 337: 175– 182.

Chuan M.C., Shu G.Y., Liu J.C. 1996. **solubility of heavy metals in a contaminated soil: effects of redox potential and pH.** Water, Air, and Soil Pollution 90: 543-556,

Cieślinski G., Van Rees K.C.J., Szmigielska A.M., Krishnamurti G.S.R. Huang, P.M. 1998. **Low-molecular-weight organic acids in rhizosphere soils of durum wheat and their effect on cadmium bioaccumulation.** Plant and Soil 203 109-117

Clements S. 2006. **Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants.** Biochimie 88: 1707–1719 **Code of Practice. General Principles of Food Hygiene.** CA/RCP 1 1969, rev. 3

Codex Alimentarius Commission (FAO/ WHO) 2001 **Food additives and contaminants.** Joint FAO/WHO Food Standards Programme; ALINORM 01/12A:1- 289.

Colangelo E.P., Guerinot M.L. 2006 **Put the metal to the petal: metal uptake and transport throughout plants.** Current Opinion in Plant Biology 9:322–330

Cook B.D., Allan D.L. 1992 **Dissolved organic carbon in old field soils: Total amounts as a measure of available resources for soil mineralization.** Soil Biology and Biochemistry 24:585–594,

Crohn D. 2004 **Nitrogen mineralization and its importance in organic waste recycling Proceedings.** National Alfalfa Symposium, 13-5, San Diego, CA, UC Cooperative Extension, University of California [http://www.ucanr.org/alf\\_symp/2004/04-277.pdf](http://www.ucanr.org/alf_symp/2004/04-277.pdf) visto 04/2015

Cruz M.P. 2010 **Estimación de la salinidad del lago de Xochimilco a dos diferentes niveles (superficie y fondo) considerando ciertos parámetros químicos** UNAM Facultad de Estudios Superiores de Zaragoza Tesis de licenciatura

## **D**

Dakora F.D., Phillips D.A., 2002. **Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments.** Plant and Soil 245: 35–47.

Declaration of Quito **Urban agriculture in 21st century cities 2000**  
<http://www.ruaf.org/sites/default/files/Quito%20Declaration-Ingles.pdf>

De La Rosa B.J. 2006 **Contaminación del lagote Xochimilco y su influencia en la agricultura local** tesis de licenciatura Facultad de Filosofía y Letras UNAM

De Oliveira M.L.E., Tonetti A.L., Stefanutti R., Coraucci F.B. 2013 **Application of Reclaimed Wastewater in the Irrigation of Rosebushes**. Water, Air, & Soil Pollution 224:1669 1-7.

Díez M., Simón M., García I., Dorronsoro C., Aguilar J., 2002. **Capacidad de depuración del suelo frente al Cu y Pb. avances en calidad ambiental**. Universidad de Salamanca ISBN: 84-7800-811-X. 1: 239-244

Dinis M.L., Fiúza A 2011 **Exposure assessment to heavy metals in the environment: measures to eliminate or reduce the exposure to critical receptors** L.I. Simeonov *et al.* (eds.), Environmental Heavy Metal Pollution and Effects on Child Mental 27 Development: Risk Assessment and Prevention Strategies, Springer Science Business Media B.V.

Dong J., Mao W.H., Zhang G.P., Wu F.B., Cai Y. 2007 **Root excretion and plant tolerance to cadmium toxicity** Plant Soil Environ., 53:(5): 193–200.

Drexler J., Fisher N., Henningsen G., Lanno R., McGeer J., Sappington K. 2003. **Issue paper on the bioavailability and bioaccumulation of metals**. DRAFT. U.S. Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum. Contract #68-C-98-148. Submitted by ERG.

Dube A., Zbytniewski R., Kowalkowski T., Cukrowska E., Buszewski B 2001. **Adsorption and migration of heavy metals in soil polish** Journal of Environmental Studies 10: 1 1-10

Duffus J.H. 2002. **Heavy metals a meaningless term?** (IUPAC Technical Report) Pure Appl. Chem., 74:793–807

Durán, C.P.A. 2010 **Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: ejemplos de los andes peruanos y de la cordillera prelitoral** Catalana Universidad de Barcelona Tesis Doctoral

## **E**

Efremova M., Izosimova A. 2012 **Contamination of agricultural soils with heavy metals** Chapter35 In: Sustainable Agriculture Ed. Christine Jakobsson. Uppsala: Baltic University.

Ekubo A.A., Abowei J.F. 2011 **Review of Some Water Quality Management Principles in Culture Fisheries** Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 3(12): 1342-1357,

Espinoza-García A.C., Mazari-Hiriart M., 2006. **Atlas de culturas del agua en América Latina y el Caribe. Pueblos indígenas de México y agua: Xochimilcas México**. Instituto de Ecología de la UNAM, 1-30.

Ezcurra E., 1996 **De las chinampas a la megalópolis. El medio ambiente en la cuenca de México** Fondo De Cultura Económica.

## **F**

FAO/WHO (1992) Pescod M.B. 1992 **Wastewater treatment and use in agriculture** - FAO irrigation and drainage paper 47 Chapter 2 **Wastewater quality guidelines for agricultural use**. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.  
<http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e04.htm#2.4> water quality guidelines for maximum crop production

Felix-Henningsen P., Urushadze T., Steffens D., Kalandadze B., Narimanidze E., 2010. **Uptake of heavy metals by food crops from highly-polluted Chernozem-like soils in an irrigation district south of Tbilisi, eastern Georgia** Agronomy Research 8: 781–795.

Ferreira F.M., Ferracciú A.L., 2006. **Electrochemical attributes and availability of nutrients, toxic elements, and heavy metals in tropical soils**. Scientia Agricola 63: 6

Feng M.-H., Shan X.-Q., Zhang S., Wen B. 2005 **A comparison of the rhizosphere-based method with DTPA, EDTA, CaCl<sub>2</sub>, and NaNO<sub>3</sub> extraction methods for prediction of bioavailability of metals in soil to barley** Environmental Pollution 137: 231-240.

Fijałkowski K., Kacprzak M., Grobelak A., Placek A.. 2012. **The influence of selected soil parameters on the mobility of heavy metals in soils.** Inżynieria i Ochrona Środowiska 15:81-92.

Flavel T.C., Murphy D.V. 2006. **Carbon and nitrogen mineralization rates after application of organic amendments to soil** Journal Environmental Quality 35:183–193.

Flores R.G.A., 2009. **Análisis preliminar de algunos factores físicos-químicos indicadores de la calidad del agua en Xochimilco** Tesis de licenciatura Facultad de ciencias UNAM.

Fontes M 2012 **Behavior of Heavy Metals in Soils Individual and Multiple Competitive Adsorption** Chapter 3 Pages 77–117 **Competitive Sorption and Transport of Heavy Metals in Soils and Geological Media** CRC Press Edited by H . Magdi Selim

Frische T., Klaus-Holger M., Filser J., 2003 **Assessing the bioavailability of contaminants in soils: a review on recent concepts** Centre for Environmental Research and Technology, University of Bremen, Germany 66/03 1-128

Fuentes R.E. 2001 **Estudio comparativo de suelos de chinampa contaminados por sales y/o sodio en Xochimilco Mixquic y Tlahuac** UNAM Facultad de ciencias Tesis de licenciatura

## **G**

Galán H.E., Romero B.A., 2008 **Contaminación de suelos por metales pesados.** Macla revista de la sociedad española de mineralogía 10: 48-60.

Gałaszka A., Migaszewski Z. M. 2011 **Geochemical background – an environmental perspective** Mineralogía, 42:1 7-17

Gambrell R.P., Wiesepape J.B., Patrick W.H., Duff M.C., 1991. **The effects of pH, redox, and salinity on metal release from a contaminated sediment:** Water, Air, and Soil Pollution. 57: 359-367.

García C., Galicia S., Aguilera N., Reyes L.. 1994. **Organic matter and humic substances contents in chinampa soils from Xochimilco-Tlahuac Areas (México).** In: 15 th World Congress of Soil Science. Acapulco. México. 3: Symposium ID-12.pp: 368-383.

García-Díaz J.C., Méndez-Romero F., 2003. **Relación entre las propiedades edáficas de un antrosol cumulico y el contenido de metales pesados totales y biodisponibles mediante análisis estadístico multivariante** 27 Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa Lleida.

Garcia G, Zanuzzi AL, Faz A. 2005 **Evaluation of heavy metal availability prior to an in situ soil phytoremediation program.** Biodegradation. 16:187-94.

Giacalone A., Gianguzza A., Orecchio S., Piazzese D., Dongarrà G., Sciarrino S., Varrica D., 2005. **Metals distribution in the organic and inorganic fractions of soil: a case study on soils from Sicily.** Chemical Speciation and Bioavailability 17: 83-93

Giuffré L., Ratto S., Marbán L., Schonwald J., Romaniuk R. 2005. **Riesgo por metales pesados en horticultura urbana** Ciencia del Suelo Argentina 23:1 101-106

González F.E., Tornero C., Cruz M.A., Bonilla F.N., 2009. **Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano** Revista. Internacional. Contaminación. Ambiental. 25: 15-22.

González F.E., Tornero C.M.A., Sandoval C.E., Pérez M. A., Gordillo M. A.J. 2011. **Biodisponibilidad y fraccionamiento de metales pesados en suelos agrícolas enmendados con biosólidos de origen municipal**. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 27: 291-301

González-López M., Fierro Á.D., Montiel S.D., Ruiz J.L., Olivares O.J., Romualdo J., 2009. **La degradación de los suelos cultivados en el sur del D.F., propuestas para manejo sostenible**. Agricultura Sostenible. 6: 98.

Grattan S.R. 2002 **Irrigation water salinity and crop production** Agriculture and Natural Resources 8066 9

Greger M. 2006 **Influence of water relations and growth rate on plant element uptake and distribution**. Stockholm. Sweden: Svensk Kärnbränslehantering AB <http://skb.se/upload/publications/pdf/TR-06-03.pdf> vistó el 16\_02\_2015.

Grimes S., Taylor G., Cooper J. 1999 **The availability and binding of heavy metals in compost derived from household waste** Journal of Chemical Technology and Biotechnology 74:1125-1130

Guo M., Chorover J. 2003 **Transport and fractionation of dissolved organic matter in soil columns** Soil Science 168:108-118.

## **H**

Hall J.L. 2002 **Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance**. Journal of Experimental Botany 53: 1-11.

Hamon R., McLaughlin M. 2003. **Food crop edibility on the river flood plain report** for OK Tedi Mining Ltd CSIRO Australian Centre for Environmental Contaminants Research [http://www.oktedi.com/attachments/246\\_030815\\_Food%20Crop%20Edibility\\_Hammon%20&%20McLaughlin\\_CSIRO\\_FINAL.pdf](http://www.oktedi.com/attachments/246_030815_Food%20Crop%20Edibility_Hammon%20&%20McLaughlin_CSIRO_FINAL.pdf)

Hamon R., McLaughlin M., Gilkes R., Rate A., Zarcinas B., Robertson A., Cozens G., Radford N., Bettenay L. 2004 **Geochemical indices allow estimation of heavy metal background concentrations in soils**, *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB1014

Harati M., Varavi M., Tamadon R.M., Foghi B. 2011 **Effect of urban wastewater usage and problems of accumulation of heavy metals in agricultural lands (south of Tehran)**. African Journal of Agricultural Research 6:14 3224-3231.

Harmsen J. 2007 **Measuring bioavailability: from a scientific approach to standard methods**. Journal of Environmental Quality 36 1420 – 1428.

Harter R.D., Naidu R. 2001. **An assessment of environmental and solution parameter impact on trace-metal sorption by soils** Soil Science Society of America Journal 65:597–612.

Heredia W., Peirano P., Borie G., Aguilera M., 2002 **Soil organic matter–metal interactions in Chilean volcanic soils under different agronomic management** Communications In Soil Science And Plant Analysis 33(13-14): 2083-2099.

Hernández B.J.A., Fernández T.M.T, Alarcón B.M.A., 2005. **Valores de fondo y valores genéricos de referencia para Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn en suelos del campo de Cartagena, Murcia (España)** Edafología 12: 105-114

Hernández L. 2006 **La agricultura urbana y caracterización de sus sistemas productivos y sociales, como vía para la seguridad alimentaria en nuestras ciudades**. Cultivos Tropicales, 27:2, 13-25, .

Hernandez-Soriano M.C., Sevilla-Perea A., Kerré B., Mingorance M.D. 2013. **Stability of organic matter in anthropic soils: a spectroscopic approach**. In: *Soil processes and current trends in quality assessment*.

Chapter 8 Maria C. Hernandez-Soriano (Ed). InTech-Open Access Publisher in Science, Technology and Medicine

Hocine-Benabid M. Fouzi-Ghorab, Abdelbaki D. 2007 **Cadmium as an environmental pollutant study of evolution of cadmium, its effects on beans (*Phaseolus vulgaris*) and its interaction with zinc**. Research Journal of Applied Sciences, 2: 712-714.

Hodson M., Vijver M., Peijnenburg W.. 2011. **Bioavailability in soils. In FAS wartjes (Ed.), Dealing with contaminated sites: from theory toward practical application**. Springer. 721-747.

Hossain M.A., Piyatida P., Teixeira da Silva J.A., Fujita M. 2012 **Molecular Mechanism of Heavy Metal Toxicity and Tolerance in Plants: Central Role of Glutathione in Detoxification of Reactive Oxygen Species and Methylglyoxal and in Heavy Metal Chelation**. Journal of Botany 2012:37

Hsiao T.C., Xu Liu-Kang 2000 **Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport**. Journal of Experimental Botany 51: 350: 1595-1616.

Hu Y. 2008 **The Effects of Oxidation-Reduction Potential on the Solubility of Phosphorus in Agricultural**. Water Management Systems Master of Science Department of Bioresource Engineering McGill University, Montreal

Hui-lin X., Xi-jian Z. 2000 **Effects of Soil Warming on Some Soil Chemical Properties Soil and Environmental**. Sciences 9:316-321

Hue N.V., Silva J.A. 2000 **Organic Soil Amendments for Sustainable Agriculture: Organic Sources of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium**. Chapter 15 Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture J. A. Silva and R. Uchida, eds. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa

## **I**

Ikkonen E., García-Calderón N, Stephan-Otto E., Fuentes-Romero E., Ibáñez-Huerta A., Martínez-Arroyo A., Krasilnikov P., 2012. **CO<sub>2</sub> Production in anthropogenic Chinampas soils in Mexico City**. Spanish Journal of Soil Science 2: 62-73.

Islam E.U., Yang X.-E., He Z-L., Mahmood Q. 2007 **Assessing potential dietary toxicity of heavy metals in selected vegetables and food crops**. Journal of Zhejiang University Science B 8:1-13.

Izazola H. 2001. **Agua y sustentabilidad en la Ciudad de México**. Estudios Demográficos y Urbanos. 47:285-320

## **J**

Järup L. 2003 **Hazards of heavy metal contamination** British Medical Bulletin 68:167–182

Jenny Hans. 1994. **Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology** Dover Publications, Inc. New York <http://www.soilandhealth.org/01aglibrary/010159.Jenny.pdf>

Jiménez S.I. 2004 **Evaluación de la concentración de metales pesados en suelo y hortalizas de la zona chinampera de Xochimilco** FES Zaragoza UNAM tesis de licenciatura.

John D.A, Leventhal J.S. 1995. **Bioavailability of metals**. Ch. 2 in: Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models Edward A. du Bray, Editor. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey Open-File Report 95-831, Denver, Colorado. <http://pubs.usgs.gov/of/1995/ofr-95-0831/CHAP2.pdf> vistó 10/2015

Jones D.L., Willett V.B. 2006 **Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil.** *Soil Biology & Biochemistry*.38:991–999

Jung M.C. 2008 **Heavy metal concentrations in soils and factors affecting metal uptake by plants in the vicinity of a Korean Cu-W mine** *Sensors* 8: 2413-2423.

## **K**

Kabata-Pendias A. 2004. **Soil plant transfer of trace elements an environmental issue** *Geoderma* 122:143-149

Kabata-Pendias A., Pendias H. 2011. **Trace Elements in Soils and Plants**, 4nd Edition, CRC Press. 534pp.

Kadhodaie A., Kelich S. Baghbani A.. 2012. **Effects of salinity levels on heavy metals (cd, pb and ni ) absorption by sunflower and sudangrass** *Plants Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences* 1:12 47- 53

Kemmitt S.J., Wright D., Gouldingb K.W. Jone D.L. 2006 **pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils** *Soil Biology & Biochemistry* 38: 898–911.

Kim H. Tan 2005 **Soil Sampling, Preparation, and Analysis**, Second Edition CRC Press Taylor & Francis group. 672 Pages

Krasilnikov P., Gutiérrez-Castorena M.C., Ahrens R.J., Cruz-Gaistardo C.O., Sedov S., Solleiro-Rebolledo E. 2013. **Major Soil Types and Their Classification Chapter 4 World Soils.** Book Series The Soils of Mexico Springer 127-139

Krishnamurti G.S.R. 2008 **Chemical methods for assessing contaminant bioavailability in soils** *Developments in Soil Science* 32: 495-520

Krull E.S., Skjemstad J.O., Baldock J.A.. 2004 **Functions of soil organic matter and the effect on soil properties** CSIRO Land & Water, PMB 2, Glen Osmond, SA 5064 <http://grdc.com.au/uploads/documents/cso000291.pdf> visto el 12/2014

Kumar V., Chopra A.K. 2011. Alterations in physico-chemical characteristics of soil after irrigation with Paper mill effluent *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* 3:7-22.

## **L**

Landon, J.R.. 1984. **Booker tropical soil manual.** Booker Agriculture International Limited. Londres, Inglaterra. 19-38.

Lasat M.M. 2002. **Phytoextraction of Toxic Metals: A Review of Biological Mechanisms.** *Journal of Environmental Quality* 31:109-120

Lewis B.G. 2005 **Soil chemistry environmental and ecological chemistry.** Vol. II. Encyclopedia of life support system (EOLSS). Soil Chemistry, Northwestern University, Evanston, Illinois archived from [www.eolss.net/Sample-Chapter/C06/E6-13-03.00.pdf](http://www.eolss.net/Sample-Chapter/C06/E6-13-03.00.pdf)

Liao Y.C., Chien S.W., Wang M.C., Shen Y., Hung P.L., Das B.. 2006 **Effiect of transpiration on Pb uptake by lettuce and on water soluble low molecular weight organic acids in rhizosphere** *Chemosphere* 65: 343–351.

Liu X., Herbert S.J., Hashemi A.M., Zhang X., Ding G.. 2006 **Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation – a review** Plant Soil Environ., 52, (12): 531–543.

Lombi E., Wenzel W., Adriano C. 1998 **Soil contamination, risk reduction and remediation** Land Contamination & Reclamation 6:183-197

López-Chuken U. López-Domínguez J., Parra-Saldivar R., Moreno-Jiménez E., Hinojosa-Reyes L., Guzmán-Mar J.L., Olivares-Sáenz E., 2012. **Implications of chloride-enhanced cadmium uptake in saline agriculture: modeling cadmium uptake by maize and tobacco.** International Journal of Environmental Science and Technology 9: 69-80.

López-Lopez E., Sedeño-Díaz J., Ortíz O.E., Rosas C.M., Abeja P.O. 2010. **Health condition assessment in lake Xochimilco (Mexico)** Romanian Journal of Biology - Zoology. 55: 69 - 80.

López V.L.M. 2006 **Determinación de los Parámetros Físicos del suelo (Textura y Estructura) de las Delegaciones Xochimilco y Tlahuac, D.F.** UAM Tesis de licenciatura

Lugo-Morin Diosey Ramón 2010. **El uso de aguas residuales en la agricultura en México** Ciencia y Sociedad 35:4

## **M**

Magnusona B., Munrob I., Abbot P., Baldwin N., Lopez-Garcia R., Lyb K., McGirr L., Roberts A. Socolovskye S. 2013 **Review of the regulation and safety assessment of food substances in various countries and jurisdictions** Food Additives & Contaminants: Part A, 30: 7 1147–1220

Mahmood T. 2010 **Review Phytoextraction of heavy metals – the process and scope for remediation of contaminated soils.** Soil & Environ. 29:2 91-109

Mamphiswana N.D., Mashela P.W., Mdee L.K.. 2011 **Accumulative capabilities of essential nutrient elements in organs of Monsonia burkeana African.** Journal of Biotechnology 10:16849-16853.

Manara A. 2012 **Plant Responses to Heavy Metal Toxicity**, Chapter 2 A. Furini (ed.), Plants and Heavy Metals. SpringerBriefs in Biometals 27-53

Mapanda F., Mangwayana E.N., Giller K.E., Nyamangara J., 2007. **Uptake of heavy metals by vegetables irrigated using wastewater and the subsequent risks in harare, zimbabwe** Physics And Chemistry Of The Earth, Parts 32: 1399-1405.

Marco legal Argentina. > Residuos Decreto 831/93 > Anexo II Tabla 9 Decreto Reglamentario de la Ley 24.051 sobre régimen de desechos peligrosos, Niveles guía de calidad suelos [http://www2.medioambiente.gov.ar/mlegal/residuos/dec831/dec831\\_anxII\\_t9.htm](http://www2.medioambiente.gov.ar/mlegal/residuos/dec831/dec831_anxII_t9.htm) visto 08/2015

Martínez G., Rodríguez L., Senior W. 2002 **Especiación de cd, zn, cr y pb en núcleos de sedimentos de la bahía de bergantín, edo. anzoátegui, Venezuela** Interciencia. 27:4 173-179

Mayer R. 1993. **Chemical time bombs related to forestry practice: Distribution and behaviour of pollutants in forest soils.** Land Degradation & Rehabilitation 4:275-279.

Mazhoudi S., Chaouhi A., Ghorbal M., Elferjani E. 1997 **Response of antioxidant enzymes to excess copper in tomato (*Lycopersicon esculentum*. Mill.).** Plant Science 127: 129-137.

McBride M.B. 2013 **Arsenic and Lead Uptake by Vegetable Crops Grown on Historically Contaminated Orchard Soils** Applied and Environmental Soil Science 2013:8

McCarthy P. 2001. **The principles of humic substances** Soil Science 166:730–751

McCauley A., Clain J., Jacobsen J., 2009. **Nutrient management module no. 8 soil pH and organic matter** Extension, Montana State University Collection: Environmental Sciences and Ecology: 4449-8.

McCauley A., Clain J., Jacobsen J., 2009. **Nutrient management module no. 8 soil pH and organic matter** Extension, Montana State University Collection: Environmental Sciences and Ecology: 4449-8.

McLaughlin M.J. 2005. **Heavy metals**. Encyclopedia of Soil Science, 2nd Ed Rattan

McLean J.E., Bledsoe B.E. 1992 **Behavior of metals in soils** EPA/540/S-92/018 Technology Innovation Office Office of Solid Waste and Emergency Response, US EPA, Washington, DC <http://www.epa.gov/superfund/remedytech/tsp/download/issue14.pdf> visto 10/2015

Mendonça S., De Silva E., Da Costa A.; Medeiros L., Fontes F.M., Paulo M. 2001. **Carbono orgánico extraído por soluciones salinas y su relación con otras formas de suelos tropicales**. Agrociencia 35: 397-406.

Mengel D.B. 2014 **Soils Fertility**. Purdue University Cooperative Extension Service West Lafayette, IN 47907 <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ay/ay-238.html> visto 12/2014

Merlín-Uribe Y., González-Esquivel C.E., Contreras-Hernández A., Zambrano L., Moreno-Casasola P., Astier M. 2013 **Environmental and socio-economic sustainability of chinampas (raised beds) in Xochimilco, Mexico City**. International Journal of Agricultural Sustainability, 11:3, 216-233

Mikkelsen R 2011 **Cation Exchange: A Review** International Plant Nutrition Institute (IPNI) [http://www.ipni.net/ipniweb/insights.nsf/\\$webcontents/91BDCE8054FA5A36062579413606F143/\\$file/Mikkelsen\\_Cation\\_Insights\\_2011\\_web.pdf](http://www.ipni.net/ipniweb/insights.nsf/$webcontents/91BDCE8054FA5A36062579413606F143/$file/Mikkelsen_Cation_Insights_2011_web.pdf) visto 06/2015

Mishra A., Singh A.K., Singh K.A., Pandey P., Yadav S., Khan A.H., Barman S.C. 2012 **Urban air pollution and their effects on rain water characteristics in lucknow city, India**. Journal of Environmental Research And Development 6 1127-1132.

Mohammad M., & Mazahreh N. 2003 **Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater**. Soil Science And Plant Analysis 34:1281-1294.

Mudgal V., Madaan N., Mudgal A. 2010 **Heavy metals in plants: phytoremediation: Plants used to remediate heavy metal pollution** Agriculture and Biology Journal of North America 1:1: 40-46

Mukti G. 2014. **Heavy metal stress in plants: a review** International Journal of Advanced Research 2:6 1043-105

Murguía F.F. 2008. **Trasferencia de metales pesados del suelo a plantas de lechuga (*Lactuca sativa*) en la zona chinampera de Xochimilco D.F.** UNAM Facultad de Ciencias Tesis de Licenciatura.

Myung Chae Jung 2008 **Heavy Metal Concentrations in Soils and Factors Affecting Metal Uptake by Plants in the Vicinity of a Korean Cu-W Mine**. Sensors 8: 2413-2423

## **N**

Naidu R., Bolan N.S., 2008. **Chapter 2 Contaminant chemistry in soils: Key concepts and bioavailability** Developments in Soil Science 32: 9-37.

Naidu R., Pollard S.J.T., Bolan N.S., Owens G., Pruszinski A.W. 2008 **Bioavailability: the underlying basis for risk-based land management** Developments in Soil Science 32: 53-66



Naidu R., Kookana R.S, Sumner M.E., Harter R.D., Tiller K.G., 1997 **Cadmium Sorption and Transport in Variable Charge Soils: A Review** Journal of Environmental Quality 26: 3: 602-617.

Navarro A.E., Ramos K.P., Campos K., Maldonado H.J. 2006. **Elucidación del efecto del pH en la adsorción de metales pesados mediante polímeros naturales: cationes divalentes y superficies activas** Revista Iberoamericana de Polímeros 7:113-126

Neira O.F. 2005 **Participación laboral y autonomía femenina en un contexto de agricultura urbana.** Estudios Demográficos y Urbanos 20:3 533-567

Neira Orjuela F. 2005 **Participación laboral y autonomía femenina en un contexto de agricultura urbana.** Estudios Demográficos y Urbanos, 20:3 533-567

Neumann G., Bott S., Ohler M., Mock H.-P., Lippmann R., Grosch R., Smalla K. 2014 **Root exudation and root development of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. *Tizian*) as affected by different soils** Frontiers in Microbiology. 5: 2.

Norma Oficial Mexicana **NOM-021-RECNAT-2000**, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. [www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/.../nom-021-semarnat-2000.pdf](http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/.../nom-021-semarnat-2000.pdf). visto el 12/2014

Norma Oficial Mexicana **NOM-147** Que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio; Diario Oficial de la Federación, 2007

## **O**

OECD 1994 **Environment monograph** series no. 104 risk reduction monograph no. 5: cadmium [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=ocde/gd\(94\)97](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=ocde/gd(94)97) visto 07/2015

Okoro H.K., Fatoki O.S., Adekola F.A., Ximba B.J., Snyman R.G., 2012 **A review of sequential extraction procedures for heavy metals speciation in soil and sediments.** Scientific Reports 1: 181.

Omoloye A.A., 2009 **Field accumulation risks of heavy metals and uptake effects on the biology of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae).** African Scientist 10: 75 – 88.

Ondrasek G., Rengel Z., Veres S. 2011. **Soil salinisation and salt stress in crop production.** Abiotic Stress in Plants - Mechanisms and Adaptations. Shanker A.K., Venkateswarlu B. (Ed). Croatia: InTech.

Orroño D.I., Lavado R.S. 2009 **Heavy metal accumulation in: Effects on growth and development.** International Journal of Experimental Botany 78: 75-82.

Otero L., Alden F., Gálvez V., Morales R., Sánchez I., Labaut M., Vento M., Cintra M., y Rivero L. 2007. **Caracterización y evaluación de la salinidad.** Ministerio de agricultura de Cuba instituto de suelos CENDA 1689: 1-9

Outerbridge T., 1987. **The disappearing chinampas of Xochimilco.** The Ecologist 17:2: 76 – 83.

Ozkutlu F., Ozturk L., Erdem H., McLaughlin M., Cakmak, I. 2007. **Leaf-applied sodium chloride promotes cadmium accumulation in durum wheat grain.** Plant Soil. 290: 323-331.

## **P**

PDDU Xochimilco 2005. **Programa delegacional de desarrollo urbano para la delegación del distrito federal en Xochimilco** Gaceta Oficial Del Distrito Federal 6 de mayo de 2005 No. 53- TER

[http://www.seduvi.df.gob.mx/portal/files/PDDU\\_Gacetitas/2005/PDDU%20Xochimilco.pdf](http://www.seduvi.df.gob.mx/portal/files/PDDU_Gacetitas/2005/PDDU%20Xochimilco.pdf).

(PEMBU, 2013).[http://pembu.atmosfcu.unam.mx/~enp1/datos/actual\\_plantel.html](http://pembu.atmosfcu.unam.mx/~enp1/datos/actual_plantel.html)  
[http://www.ruoa.unam.mx/pembu/condi\\_actuales.html](http://www.ruoa.unam.mx/pembu/condi_actuales.html)

Pennisi B.V., Thomas P.A., 2012. **Essential pH management in greenhouse crops** College of Agricultural and Environmental Sciences. University of Georgia. Bulletin 1256

Pereira L.R., Pittol F.L., Regina M.C., Melfi A.J., De Stefano P.S.Ma.. 2009 **Soil exchangeable cations, sugarcane production and nutrient uptake after wastewater irrigation**. *Scientia Agricola*. 66:242-249.

Pérez O., García M., Vázquez A., Colinas L., Teresa P., Navarro G, 2008 Concentración de pb, cd, ni y zn en suelos contaminados y su transferencia a la pella de brócoli *Terra Latinoamericana* 26:215-225

Perfus-Barbeoch L., Leonhardt N., Vavasseur A., Forestier C. 2002 **Heavy metal toxicity: Cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status**. *The Plant Journal*;32:539-548

Peris M.M., 2006. **Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellón** Universidad de Valencia Tesis Doctoral

Pezeshki S.R., R.D. DeLaune. 2012. **Soil oxidation-reduction in wetland and its impact on plant functioning**. *Biology*. 1:196-221.

Pilatti M.A., Imhoff S., Ghiberto P., Marano R.P. 2006 **Changes in some physical properties of mollisols induced by supplemental irrigation**. *Geoderma* 133:431-443.

Piotrowska-Niczyporuka Alicja, Bajguza Andrzej, Zambrzycka Elżbieta, Godlewska-Żyłkiewicz Beata 2012 **Phytohormones as regulators of heavy metal biosorption and toxicity in green alga *Chlorella vulgaris* (Chlorophyceae)** *Plant Physiology and Biochemistry* 52:52-65

PNUMA Programa de las naciones Unidas para el Medio Ambiente 2002 **Perspectivas del Medio Ambiente Mundial** GEO-3 Chapter2 /Tierras / Panorama mundial / Asentamientos humanos e infraestructura <http://www.unep.org/geo/geo3/spanish/index.htm>

Ponce De León C., Sommer I., Cram S., Murguía F., Hernandez M., Vanegas C.. 2010 **Metal uptake in a peri-urban *Lactuca sativa* cultivated area** *Journal of Environmental Science and Health. Part A*: 45: 111-120.

## Q

Qiana J., Xiao-quan S., Zi-jian W., Qiang T. 1996. **Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil**. *The Science of the Total Environment* 187: 131-141

Queiroz S., De Aguiar A., Araújo do N., Machado dos S., Chaves de Melo É., De Lima Xavier. 2014 **Competitive absorption of cadmium, zinc, and lead by velvet bean (*Stizolobium aterrimum*) and metal distribution among soil fractions**. *communications in soil Science and Plant Analysis*, 45: 1499-1510.

Quiñonez A.C. 2005. **Chinampas y chinamperos: los horticultores de San Juan Tezompa**. Tesis Universidad Iberoamericana.

## R

Rajeswari T.R., Sailaja N. 2014 **Impact of heavy metals on environmental pollution** *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences* 3:175-181

Ramos B., García C., Andrade E., Solís C., Murillo G., Rocha M.F. 2002 **Multielemental analysis by pixe of chinampa soils in México city**. International Journal of PIXE, 12: 237-243.

Ramos B., García C., Ortega E., Krasilnikov P. 2011 **Artificial Chinampas Soils of Mexico City: their properties and salinization hazards**. Spanish Journal of Soil Science, 1: 38-52.

Rascio N., Navari-Izzo F. 2011 **Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?** Plant Science 180:169–181

Rengasamy P. 2010 **Soil processes affecting crop production in salt-affected soils** Functional Plant Biology 37 613 - 620

Rengel Z. 2004 **Heavy metals as essential nutrients**. In: Prasad MNV (ed) **Heavy metal stress in plants**, 3rd edn. Springer, Berlin, 271-294

Reyes O.A., García C.N., 2004 **Evolución de las fracciones húmicas de suelos en la zona chinampera de la Ciudad de México** TERRA Latinoamericana, 22: 289-298

Riveros O.B. 2013 **Tratamiento de aguas residuales municipales en la ciudad de México** ingeniero civil tesis de licenciatura UNAM

Romic M. 2012. **Bioavailability Of Trace Metals In Terrestrial Environment: Methodological Issues** European Chemical Bulletin 1:11: 489-493

Rodríguez-Salazar M., Morton-Bermea O., Hernández-Álvarez E., Lozano R., Tapia-Cruz V. 2011 **The study of metal contamination in urban topsoils of Mexico City using GIS** Environ Earth Science 62:899–905

Ruiz G.E. 2012 **El patrimonio cultural y ambiental de Xochimilco en riesgo**. Tesis, Maestría en Políticas Públicas Comparadas, FLACSO México.

## S

Sagarpa 2013 **Plan rector sistema producto hortalizas del distrito federal** [http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/Documents/PlanRectorS.P.\\_Hortalizas2013.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/Documents/PlanRectorS.P._Hortalizas2013.pdf) visto el 03/2015

Saier M.H. 2002 **Families of transporters and their classification chapter1 Transmembrane transporters** Quick, Michael W edited by Michael W. Quick. Publisher: Hoboken, N.J. : Wiley-Liss 291

Salem M.A., Al-ethawi L.H. 2013 **Evaluation of salinity in some soils of irrigated brack –ashkada agriculture project, fezzan, libya** Journal of Agriculture and Veterinary Science 2:1 2319-2372

Sánchez G.A. 2006 **Efecto del riego con aguas residuales sobre la calidad de la materia orgánica extractable con agua (MOEA) y las especies de metales pesados en suelos del valle del mezquital**. Universidad Autónoma de Chapingo Tesis Licenciatura

Sánchez G.M., Hernández G.E. 2010 **Aplicación de súper oxidante a un sistema eutroficado (lago de Xochimilco)** Facultad de Estudios Superiores de Zaragoza UNAM. Tesis de licenciatura

Sánchez T.J., Ligarreto M.G., Leiva F.R. 2011 **Spatial variability of soil chemical properties and its effect on crop yields: a case study in maize (*Zea mays L.*) on the Bogota Plateau**. Agronomía Colombiana 29: 361-371.

Sanderman J., Baldock J.A., Amundson R. 2008 **Dissolved organic carbon chemistry and dynamics in contrasting forest and grassland soils**. Biogeochemistry 89:181–198

- Sarkar A., Ravindran G., Krishnamurthy V., 2013 **A brief review on the effect of cadmium toxicity: from cellular to organ level.** International Journal of Bio-Technology and Research 3: 17-36
- Schaetzl R.J., Anderson S., 2005 **Soils Genesis and Geomorphology** Cambridge University Press 832
- Schleuß U., Wu Q., Blume H.P. 1998 **Variability of soils in urban and periurban areas in Northern Germany.** Catena 33: 255-270
- Schreck E., Foucault Y., Sarret G., Sobanska S., Cécillon L., Castrec-Rouelle M., Uzu G., Dumat C. 2012 **Metal and metalloids foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: Mechanisms involved for lead.** Science of the Total Environment. 427-428: 253-262.
- Seija Flórez Camilo Ernesto 2011 **Review of urban and suburban experiences of animal breeding as an alternative of food security.** Revista de Investigación Agraria y Ambiental 2:2: 51-63
- Seth C. S., Remans T., Keunen E., Jozefczak M., Gielen H., Opdenakker K., Weyens N., Vangronsveld J., Cuypers A., 2012 **Phytoextraction of toxic metals: a central role for glutathione Plant.** Cell & Environment 35(2):334-346
- Shabala S., 2010. **Research review Physiological and cellular aspects of phytotoxicity tolerance in plants: the role of membrane transporters and implications for crop breeding for waterlogging tolerance** *New Phytologist* [http://www.plantstress.com/articles/up\\_waterlogging\\_files/waterlogging-toxicity.pdf](http://www.plantstress.com/articles/up_waterlogging_files/waterlogging-toxicity.pdf)
- Shahnawaz R.D., Tarence T., Dagar J.C., Khajanchi L., Aamir H.M., Ajay K., Hidayatullah M., Megna R.B., Samreen M., Dhananjay S. 2012 **Zinc and cadmium availability as affected by zinc fertilization and saline water irrigation in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown on cadmium polluted soil.** African Journal of Agricultural Research 7:35 4996-5004.
- Sharma K.L., Mandal B., Venkateswarlu B. 2012 **Soil quality and productivity improvement under rainfed conditions** Chapter 8 – Indian Perspectives, Resource Management for Sustainable Agriculture, Ed. Vikas Abrol
- Sherene T. 2010 **Mobility and transport of heavy metals in polluted soil environment.** An International Journal, 2:2: 112-121
- Siebe C., Jahn R., Stahr K., 1996. **Manual para la Descripción y Evaluación Ecológica de Suelos en el Campo: Chapingo, México,** Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., Publicación Especial, 4, p 57.
- Silva J., Torres P., Madera C. 2008. **Domestic wastewater reuse in agriculture. A review.** Agronomía Colombiana 26(2), 347-359
- Singh A., Agrawal M. 2010. **Effects of municipal waste water irrigation on availability of heavy metals and morpho-physiological characteristics of *Beta vulgaris* L.** Journal of Environmental Biology 31: (5): 727-736
- Singh J., Kalamdhad A.S. 2013 **Bioavailability and leachability of heavy metals during composting** **A Review** International Research Journal of Environment Sciences 2:59-64.
- Singh R., Gautam N., Mishra A., Gupta R. 2011 **Heavy metals and living systems: An overview** Indian J Pharmacol 43:3 246–253.
- Smical A.I., Hotea V., Oros V., Juhasz J., Pop E., 2008 **Studies on transfer and bioaccumulation of heavy metals from soil into lettuce.** Environmental Engineering and Management Journal 7:607-614.

Smiri M., Chaoui A., Ferjani E.E.. 2010. **Interaction Between Heavy Metals and Thiol-linked Redox Reactions in Germination.** Pakistan Journal of Biological Sciences. 13: 877-883.

Søndergaard M., Thomas D.N.2004 **Dissolved organic matter (DOM) in aquatic ecosystems: a study of European catchments and coastal waters** EU project DOMAINE.

Soriano Robles Ramón. 2005. **Agricultura Urbana en México: Situación y Perspectivas.** Revista Agraria Nueva Epoca 1:1: 6-13

Sparks D.L. 2005 **Metal and oxyanion sorption on naturally occurring oxide and clay mineral surfaces.** In: Grassian V (ed) Environmental Catalysts, Taylor and Francis Books Inc, Boca Raton, FL

Sterrett S.B., Chaney R.L., Hirsch C.E., Mielke H.W.. 1996. **Influence of amendments on yield and heavy metal accumulation of lettuce grown in urban garden soils.** Environ. Geochem. Health 18:135-142

Stevens G., Motavalli P., Scharf P., Nathan M., Dunn D., 2002. **Crop nutrient deficiencies and toxicities.** MU IPM Extension booklet 1016. University of Missouri, Columbia, MO.

Stewart, Marcel R., Laurenz Langer K., Rafferty S., Rebelo Da Silva N. and van Rooyen C. 2013 **What are the impacts of urban agriculture programs on food security in low and middle-income countries?.** Environmental Evidence, 2:7

Stolt M.H., Genthner M.H, Daniels W.L., Groover V.A., Nagle S, Haering K.C., 2000 **Comparison of soil and other environmental conditions in constructed and adjacent palustrine reference wetlands** Wetlands 20: 4: 671–683

Strosser E. 2010 **Methods for determination of labile soil organic matter: An overview** Journal of Agrobiology. 27:49–60.

Sunitha MSL, Prashant S, Kumar SA, Rao MS, Narasu ML, Kishor PBK 2014. **Cellular and molecular mechanisms of heavy metal tolerance in plants: a brief overview of transgenic plants overexpressing phytochelatin synthase and metallothionein genes.** Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology 1:3 33-48

Sytar O. Kumar A. Latowski D. Kuczynska P. Strzałka K. Prasad M. N. V. 2013. **Heavy metal-induced oxidative damage, defense reactions, and detoxification mechanisms in plants** Acta Physiol Plant 35:985–999

Szögi A.A., Hunt P.G., Sadler E.J., Evans D.E. 2004 **Characterization of oxidation-reduction processes in constructed wetlands for swine wastewater treatment** American Society of Agricultural Engineers 20: 2: 189-200

## **T**

Taboada M.A. 2003 **Soil Structural Behaviour of Flooded Soils Agriculture, Ecosystems and Environment** 90: 169-175

Takáč P., Szabová T., Kozáková L., Benková M. 2009 **Heavy metals and their bioavailability from soils in the long-term polluted Central Spiš region of SR.** Plant Soil Environ., 55:4 167-172

Tangahu B.V., Sheikh Abdullah S.R., Basri, H., Idris M., Anuar N., Mukhlisin M., 2011. **A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation.** International Journal of Chemical Engineering Article ID 939161, 31.

Tanner W., Beevers H. 2001. **Transpiration, a prerequisite for long-distance transport of minerals in plants?** Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A. 98: 9443-9447

Terrones, M.E. 2006 **Xochimilco sin arquetipo. Historia de una integración urbana acelerada en el siglo XX.** Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales. Barcelona: Universidad de Barcelona, 10: 218.

Tiller K.G. 1989 **Heavy Metals in Soils and Their Environmental Significance** Advances in Soil Science9: 113-142

Torres Lima, P.; Canabal Cristiani, B.; Burela Rueda, G.. 1989 **Agricultura y empleo en el Distrito Federal, el caso de Xochimilco.** Argumentos 61-76

Trakal L., Martínez-Fernández D., Vítková M., Komárek M. 2015 **Phytoextraction of Metals: Modeling Root Metal Uptake and Associated Processes** Chapter 6. Ansari A.A. et al. (eds.), Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, 1: 69-83

## **U**

United Nations Habitat II, 1996 **Report of the United Nations Conference on Human Settlements (HABITAT II)** Istanbul (Turkey) 1996 [http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/sites/odysee-developpement-durable/files/13/Rapport\\_Habitat\\_Istanbul\\_1996\\_anglais.pdf](http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/sites/odysee-developpement-durable/files/13/Rapport_Habitat_Istanbul_1996_anglais.pdf)

USAID Agencia Estadounidense de Desarrollo Internacional. 2008 **Manual de producción de lechuga.** 33 pp.

US Environmental Protection Agency (1998). **Method 3051a—microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils.**

Usman A.R.A., Kuzyakov k Y., Stahr K.. 2004 **Dynamics of organic c mineralization and the mobile Fraction of heavy metals in a calcareous soil Incubated with organic wastes** Water, Air, and Soil Pollution 158: 401–418.

Uwah E.I., Ndahi N.P., Abdulrahman F.I., Ogugbuaja V.O.. 2011 Heavy metal levels in spinach (*Amaranthus caudatus*) and lettuce (*Lactuca sativa*) grown in Maiduguri, Nigeria Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology 3: 264-271.

Uzu G., Sobanska S., Sarret G., Muñoz M., Dumat C.. 2010 **Foliar Lead Uptake by Lettuce Exposed to Atmospheric Fallouts.** Environ. Sci. Technol. 44, 1036–1042.

## **V**

Vallejo A.C. 1992. **Contaminación en algunas calicatas en San Gregorio Atlapulco y San Luis Tlaxiátemalco.** UNAM. Facultad de Ciencias Tesis de Licenciatura.

Vander V., Peterson L., Beverley H., 2007. **Cd accumulation in roots and shoots of durum wheat: the roles of transpiration rate and apoplastic bypass.** Journal of Experimental Botany 58: 2939-2947

Vázquez A.A. 1997 **Guía para interpretar el análisis síntesis químico del agua y suelo.** 2da edición Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Suelos.

Vega R.S., 2010. **Determinación y cuantificación de algunos metales pesados en suelo, agua y planta en un área de la zona lacustre de Xochimilco y mixquic D.F.** Facultad de ciencias UNAM. Tesis doctoral

Velazquez A,A. 1997 **Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo** Universidad Autónoma de Chapingo departamento de suelos 2da Ed

Vepraskas M.J. 2002 **Redox Potential Measurements** NC State University, U.S.A. 17 <http://www.water-research.net/course/RedoxWriteup.pdf> (visto 05/2015)

## **W**

Wei B., Yang L. 2010 **A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China** *Microchemical Journal* 94:99–107

WHO 2015 **Informe Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo (PCM) datos esenciales** [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/monitoring/JMP-2015-keyfacts-es-rev.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/JMP-2015-keyfacts-es-rev.pdf) visto 12/2015

WRB. 2007. **Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización.** Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma

Wuana R.A., Okieimen F.E., 2011, **Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation** *Ecology Article* ID 402647

## **Y**

Yan X, Zhang F, Zeng C, Zhang M, Devkota LP, Yao T. 2012 **Relationship between heavy metal concentrations in soils and grasses of roadside farmland in Nepal** *International Journal Environmental Research. Public Health.* 9: 3209-3226.

Yisa J., Jacob J.O., Onoyima C.C. 2011 **Identification of Sources of Heavy Metals Pollution in Road Deposited Sediments Using Multivariate Statistical.** *Analysis Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences* 2:4 658-663

Yuan-peng W., Ji-yan S., Qi L., Xin-cai C., Ying-xu C. 2007 **Heavy metal availability and impact on activity of soil microorganisms along a Cu/Zn contamination gradient.** *Journal of Environmental Sciences* 19: 848–853

Yu L., Longqing L., Qiang Z., Yiming Y., Heling W., Ruijun W., Jihui Z. 2013 **Influence of temperature on the heavy metals accumulation of five vegetable species in semiarid area of northwest China.** *Chemistry and Ecology At:* 6:37.

## **Z**

Zafar R., Sumira T., 2007, **Detritus and Decomposition in Ecosystems** Editor New India Publishing 269

Zambrano L., Contreras V., Mazari-Hiriart M., Zarco-Arista A.E. 2009 **Spatial heterogeneity of water quality in a highly degraded tropical freshwater ecosystem.** *Environmental Management* 43:249–263

Zarazúa-Ortega G., Poblano-Bata J., Tejeda-Vega S., Ávila-Pérez P., Zepeda-Gómez C., Ortiz-Oliveros H., Macedo-Miranda G. 2013 **Assessment of Spatial Variability of Heavy Metals in Metropolitan Zone of Toluca Valley, Mexico, Using the Biomonitoring Technique in Mosses and TXRF Analysis** *The Scientific World Journal* 2013: 426492 <http://dx.doi.org/10.1155/2013/426492>

Zech W., Senesi N., Guggenberger G., Kaiser K., Lehmann J., Miano T.M., Miltner A., Schroth G. 1997 **Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics** *Geoderma* 79: 117-161pp

Zhang R., Zhang G.L., Ji Y.Y., Li G., Chang H., Yang D.L. 2013 **Effects of different fertilizer application on soil active organic carbon** *Huan Jing Ke Xue.* 34:277-82

Zoltán S. 2008 **Spatial and temporal pattern of soil pH and Eh and their impact on solute iron content in a wetland (Transdanubia, Hungary)** *AGD Landscape & Environment* 2: 34-45.

## ANEXOS

### 1. Ficha técnica de la lechuga (*Lactuca sativa* L.)



Taxonomía:  
Familia: Asteraceae

Hábitat

La lechuga es una planta anual autógama, su origen se sitúa en Asia, se encuentra ampliamente cultivada en todo el mundo y presenta numerosas variedades.

Morfología.

- Raíz: no sobrepasa los 25 cm. de profundidad, es pivotante, corta y con ramificaciones.
- Tallo: es cilíndrico y ramificado.
- Hojas: están dispuestas en forma arrosetada (variedades romanas), y hay casos en donde se encuentran de forma acogollada (variedad Orejona). El borde de los limbos pueden ser liso, ondulado o aserrado.
- Inflorescencia: son capítulos florales amarillos dispuestos en racimos o corimbos.

Semillas: están provistas de un vilano plumoso.

Morfológicamente presenta dos tipos: uno de hoja suelta y otro formando cogollos (acogolladas o arrepolladas) Variedades comerciales: romana, iceberg, trocadero, batavia, maravilla, Baby, Lolla rossa entre otras Briones & Méndez 2010.

Composición química

- Agua 95%
- Hidratos de carbono 1, 5% (fibra 1%)
- Proteínas 1, 5%
- Lípidos 0, 3%
- Potasio 180 mg/100 g
- Sodio 10 mg/100 g
- Fósforo 25 mg/100 g
- Calcio 40 mg/100 g
- Hierro 1 mg/100 g
- Vitamina C 12 mg/100 g
- Vitamina A 0, 2 mg/100 g



## 2. Biomasa generada por las lechugas.

Peso húmedo y seco de las plantas colectadas en la temporada de secas (M1 Plántula) 01/04/2013							
Peso húmedo (g)			Peso seco (g)			% de masa	% de humedad
Hojas	Raíz	Hoja + Raíz	Hojas	Raíz	Hoja + Raíz		
11,46	2,44	13,90	0,58	0,10	0,68	4,92	95,08
12,12	2,58	14,70	0,59	0,10	0,70	4,74	95,26
13,77	2,93	16,70	0,67	0,12	0,79	4,74	95,26
16,24	3,46	19,70	0,80	0,14	0,94	4,76	95,24
18,46	3,94	22,40	0,89	0,15	1,04	4,66	95,34
18,71	3,99	22,70	0,91	0,16	1,07	4,69	95,31
20,53	4,37	24,90	1,00	0,17	1,18	4,74	95,26
23,33	4,97	28,30	1,12	0,20	1,32	4,65	95,35
25,47	5,43	30,90	1,26	0,22	1,48	4,78	95,22
32,56	6,94	39,50	1,68	0,29	1,97	4,99	95,01
Promedio							
19,26	4,11	23,37	0,95	0,17	1,12	4,77	95,23
DS							
6,55	1,40	7,94	0,34	0,06	0,40	0,11	0,11

Peso húmedo de las plantas y ya secas, colectadas en la temporada de secas (M2 Juvenil) 22/04/2013							
Peso húmedo (g)			Peso seco (g)			% de masa	% de humedad
Hojas	Raíz	Hoja + Raíz	Hojas	Raíz	Hoja + Raíz		
103,50	18,90	122,40	3,02	0,45	3,48	2,84	97,16
106,38	19,42	125,80	3,16	0,48	3,64	2,89	97,11
119,57	21,83	141,40	4,11	0,62	4,73	3,34	96,66
130,48	23,82	154,30	5,01	0,75	5,76	3,73	96,27
147,56	26,94	174,50	5,15	0,77	5,93	3,40	96,60
157,37	28,73	186,10	5,19	0,78	5,97	3,21	96,79
167,51	30,59	198,10	5,47	0,82	6,29	3,18	96,82
172,59	31,51	204,10	5,63	0,85	6,47	3,17	96,83
184,26	33,64	217,90	5,83	0,88	6,71	3,08	96,92
198,04	36,16	234,20	6,28	0,94	7,23	3,09	96,91
Promedio							
148,72	27,16	175,88	4,89	0,73	5,62	3,19	96,81
DS							
32,85	6,00	38,85	1,10	0,17	1,27	0,26	0,26

Peso húmedo de las plantas y ya secas, colectadas en la temporada de secas (M3 Adulto) 13/05/2013							
Peso húmedo (g)			Peso seco (g)			% de masa	% de humedad
Hojas	Raíz	Hoja + Raíz	Hojas	Raíz	Hoja + Raíz		
235,84	43,06	278,90	5,42	0,81	6,24	2,24	97,76
241,17	44,03	285,20	5,51	0,83	6,34	2,22	97,78
246,66	45,04	291,70	5,53	0,83	6,37	2,18	97,82
252,41	46,09	298,50	5,63	0,85	6,47	2,17	97,83
259,51	47,39	306,90	5,63	0,85	6,48	2,11	97,89
261,54	47,76	309,30	5,65	0,85	6,50	2,10	97,90
268,56	49,04	317,60	5,74	0,86	6,60	2,08	97,92
275,07	50,23	325,30	5,75	0,86	6,62	2,03	97,97
276,34	50,46	326,80	5,77	0,87	6,64	2,03	97,97
297,40	54,30	351,70	6,32	0,95	7,27	2,07	97,93
Promedio							
261,45	47,74	309,19	5,70	0,86	6,55	2,12	97,88
DS							
18,62	3,40	22,03	0,25	0,04	0,28	0,07	0,07

Peso húmedo de las plantas y ya secas, colectadas en la temporada de lluvias (M1 Plántula) 29/08/2013							
Peso húmedo (g)			Peso seco (g)			% de masa	% de humedad
Hojas	Raíz	Hoja + Raíz	Hojas	Raíz	Hoja + Raíz		
10,32	1,88	12,20	0,57	0,09	0,65	5,37	94,63
13,36	2,44	15,80	0,67	0,10	0,77	4,88	95,12
15,56	2,84	18,40	0,81	0,12	0,94	5,09	94,91
18,69	3,41	22,10	0,90	0,14	1,04	4,70	95,30
18,94	3,46	22,40	0,91	0,14	1,04	4,66	95,34
19,36	3,54	22,90	0,96	0,14	1,10	4,81	95,19
22,92	4,18	27,10	1,10	0,17	1,26	4,67	95,33
23,93	4,37	28,30	1,14	0,17	1,32	4,65	95,35
26,13	4,77	30,90	1,28	0,19	1,48	4,78	95,22
33,40	6,10	39,50	1,71	0,26	1,97	4,99	95,01
Promedio							
20,26	3,70	23,96	1,01	0,15	1,16	4,86	95,14
DS							
6,68	1,22	7,90	0,33	0,05	0,38	0,23	0,23

Peso húmedo de las plantas y ya secas, colectadas en la temporada de lluvias (M2 Juvenil) 19/09/2013							
Peso húmedo (g)			Peso seco (g)			% de masa	% de humedad
Hojas	Raíz	Hoja + Raíz	Hojas	Raíz	Hoja + Raíz		
190,46	34,64	225,10	5,14	0,78	5,91	2,63	97,37
191,05	34,75	225,80	5,15	0,78	5,93	2,63	97,37
198,92	36,18	235,10	5,46	0,83	6,29	2,68	97,32
204,25	37,15	241,40	5,47	0,83	6,29	2,61	97,39
256,71	46,69	303,40	5,62	0,85	6,47	2,13	97,87
286,66	52,14	338,80	5,83	0,88	6,71	1,98	98,02
294,95	53,65	348,60	5,84	0,88	6,72	1,93	98,07
296,30	53,90	350,20	5,97	0,90	6,87	1,96	98,04
314,58	57,22	371,80	6,28	0,95	7,23	1,94	98,06
316,86	57,64	374,50	6,29	0,95	7,25	1,94	98,06
Promedio							
255,07	46,40	301,47	5,70	0,86	6,57	2,24	97,76
DS							
53,40	9,71	63,11	0,41	0,06	0,48	0,34	0,34

Peso húmedo de las plantas y ya secas, colectadas en la temporada de lluvias (M3 Adulto) 03/10/2013							
Peso húmedo (g)			Peso seco (g)			% de masa	% de humedad
Hojas	Raíz	Hoja + Raíz	Hojas	Raíz	Hoja + Raíz		
385,31	70,09	455,40	5,05	0,76	5,82	1,28	98,72
393,94	71,66	465,60	5,30	0,80	6,10	1,31	98,69
396,23	72,07	468,30	5,30	0,80	6,11	1,30	98,70
440,73	80,17	520,90	5,58	0,84	6,42	1,23	98,77
446,99	81,31	528,30	5,58	0,85	6,43	1,22	98,78
460,45	83,75	544,20	5,67	0,86	6,52	1,20	98,80
488,28	88,82	577,10	5,79	0,88	6,67	1,16	98,84
525,51	95,59	621,10	5,81	0,88	6,69	1,08	98,92
536,17	97,53	633,70	6,16	0,93	7,09	1,12	98,88
576,96	104,94	681,90	6,29	0,95	7,24	1,06	98,94
Promedio							
465,06	84,59	549,65	5,65	0,86	6,51	1,20	98,80
DS							
65,71	11,95	77,67	0,38	0,06	0,44	0,09	0,09

### 3. Descripción de las características de los metales de interés

Cadmio	Fuente natural mineral metálico Fuentes antrópicas	o Carbonatos y sulfuros minerales de cinc y cobre
	Función biológica	Minería y fundición, manufactura metálica, industria del plástico, industria microelectrónica, manufactura de baterías, depósitos de residuos y escombreras metálicas, fertilizantes fosfatados, lodos de depuradora.
	Toxicidad	No conocida Muy tóxico: se acumula principalmente en hígado y riñón. Inhibe funciones de enzimas que contienen grupos sulfhidrilo (SH). Atraviesa la barrera placentar y causa malformaciones. Interfiere en la reproducción.
Cobre	Fuente natural mineral metálico Fuentes antrópicas	o Metal libre ( $\text{Cu}^0$ ), Sulfuro de cobre ( $\text{CuS}_2$ ), Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), drenaje de minas.
	Función biológica	Minería y fundición, manufactura metálica, industria microelectrónica, tratamiento de la madera, depósitos de desechos y escombreras metálicas, industria pirometalúrgica, estiércol de cerdos, plaguicidas, residuos. Es uno de los más importantes elementos traza en la nutrición de plantas. Esencial para todos los organismos. Al menos 30 proteínas y enzimas contienen cobre.
	Toxicidad	Participa como coenzima de varias enzimas; transporte de oxígeno molecular, transferencia de electrones Moderadamente tóxico a los mamíferos, muy tóxico a las plantas; la mayoría de los organismos lo excreta. En concentraciones altas produce “catarro” gastrointestinal y se relaciona a la hematocromatosis.
Cromo	Fuente natural mineral metálico Fuentes antrópicas	o Cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}$ ), Óxido de cromo (III).( $\text{CrO}_3$ )
	Función biológica	Manufactura metálica, industria del plástico, tratamiento de la madera, refinерías, industria pirometalúrgica, partículas residuales de minerales. Esencial: asociado al componente -globulina de la proteína del plasma. Su actividad biológica se asocia al cromo +3. Funciona como factor de la glucosa; relacionado a la insulina en su papel biológico.
	Toxicidad	Altamente tóxico como $\text{Cr}^{6+}$ ; moderado como $\text{Cr}^{3+}$ . Los compuestos insolubles retenidos en el pulmón por períodos largos pueden producir cáncer en ese órgano.
Hierro	Fuente natural mineral metálico Fuentes antrópicas	o Los minerales de hierro más comunes son: la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la limonita ( $\text{FeO}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ); la siderita ( $\text{FeCO}_3$ ); la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y la pirrotita ( $\text{FeS}$ ).
	Función biológica	Se utiliza en la minería, fundición, industria del hierro y acero, refinерías El hierro se usa para la fabricación de piezas de hierro y acero fundidos y en aleaciones con otros metales. También se emplea para aumentar la densidad de los líquidos en las perforaciones petrolíferas Esencial a todos los organismos. Necesario para la síntesis enzimática de clorofila en plantas, en animales es esencial como un constituyente de la sangre. la mayoría está unido a proteínas, ya sea en forma de compuestos tipo hemo Más de 50 proteínas

			<p>contienen hierro. Las mayores concentraciones se localizan en el hígado, bazo, riñón y corazón.</p> <p>transporte y almacenamiento de oxígeno molecular, transferencia de electrones, fijación de nitrógeno</p> <p>ligeramente tóxico. No se conocen efectos nocivos por aguas que contienen hierro. Estas presentan sabor desagradable y pueden producir precipitados.</p>
Manganeso	<p>Fuente natural mineral metálico</p> <p>Fuentes antrópicas</p> <p>Función biológica</p> <p>Toxicidad</p>	o	<p>Está presente en óxidos de carbonatos y silicatos. El más importante es el dióxido de manganeso (<math>MnO_2</math>), que se encuentra naturalmente en depósitos sedimentarios de pirolusita y rodocrosita (<math>MnCO_3</math>).</p> <p>Se utiliza en la industria acerera como agente de aleación para la fabricación de aceros especiales, aluminio y cobre. En la industria química se utiliza como agente oxidante se utiliza como recubrimiento de electrodos en varillas de soldadura, en los trituradores de rocas y en las agujas y cambios de vía de los ferrocarriles. También se emplea en la fabricación de cerámica, cerillas, vidrio y tintes. Algunas sales de manganeso se utilizan como fertilizantes, en la industria textil como decolorante y en el curtido de pieles.</p> <p>Esencial a todos los organismos; la forma biológicamente activa es el <math>Mn^{2+}</math>. Interviene en procesos de la fotosíntesis. En el plasma de la sangre humana se encuentra unido a la <math>\beta</math>-globulina.</p> <p>La única metaloproteína que contiene Mn es la piruvato carboxilasa.</p> <p>Moderadamente tóxico. Se puede presentar envenenamiento entre los mineros y se dice que afecta el sistema nervioso central. En aguas causa malos sabores, depósitos al cocer los alimentos, produce manchas y decoloraciones en la ropa. Da lugar al crecimiento de algunos micro-organismos.</p>
Plomo	<p>Fuente natural mineral metálico</p> <p>Fuentes antrópicas</p> <p>Función biológica</p> <p>Toxicidad</p>	o	<p>Galena (<math>PbS</math>).</p> <p>Minería y fundición, industria del hierro y acero, refinерías, industria de la pintura, gases de escape de los automóviles, fontanería de plomo, manufactura de baterías, lodos de depuradora, plaguicidas, depósitos de residuos minerales y escombreras.</p> <p>No conocida</p> <p>Muy tóxico a las plantas. Veneno acumulativo en mamíferos. Los tejidos suaves y sanguíneos son los compartimentos de intercambio rápido del plomo, mientras el esqueleto es de intercambio lento. Causa trastornos en la síntesis de compuestos hemo; inhibe una enzima que actúa en la síntesis de porfirinas. Se establece correlación entre el envenenamiento con plomo y enfermedades del riñón y sistema nervioso.</p>
Zinc	<p>Fuente natural mineral metálico</p> <p>Fuentes antrópicas</p> <p>Función biológica</p>	o	<p>Blenda (<math>ZnS</math>), Willemita (<math>ZnSiO_4</math>), Calamina (<math>ZnCO_3</math>), drenaje de minas.</p> <p>Minería y fundición, manufactura metálica, industrias textil y microelectrónica, depósitos de residuos y escombreras metálicas, industria pirometalúrgica, lodos de depuradora, plaguicidas, residuos.</p> <p>Esencial a todo organismo. El Zn es un nutriente esencial para</p>

casi todas las plantas. Por esta razón las algas en ríos y lagos pueden absorber una gran parte de Zn disuelta en el agua. Además, tiene un efecto nutritivo.

Se presenta en eritrocitos, leucocitos y plaquetas. Involucrado en síntesis de proteínas y RNA, al igual que en la producción y función de varias hormonas

Toxicidad

Moderadamente tóxico; no presenta efectos tóxicos adversos excepto a muy altas concentraciones.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry <http://www.atsdr.cdc.gov/es/index.html>

#### 4. Características superficiales del suelo por temporadas

Temporada	pH 1:2.5		Pasta de saturación		COD 1:5 mg/L		MO	C	N total
	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	pH	CE	COD H <sub>2</sub> O	COD KCl	MO %	C %	N %
Secas									
M1	7.53	7.18	8.11	1.67	152.73	150.92	18.41	10.68	0.78
M1	7.24	6.97	7.96	1.80	173.83	162.57	21.85	12.67	0.895
M1	7.1	6.89	7.97	1.82	197.6	177.67	22.7	13.17	0.96
M2	7.62	7.23	8.04	1.36	165.32	151.23	19.53	11.33	0.81
M2	7.35	7.04	8.10	1.25	184.33	168.73	21.10	12.24	0.91
M2	7.16	6.85	7.89	1.56	221.26	185.32	23.47	13.61	1.065
M3	7.72	7.31	8.12	1.14	148.41	147.28	18.34	10.63	0.74
M3	7.53	7.18	8.10	1.52	170.51	165.51	21.26	12.33	0.955
M3	7.27	6.95	7.88	1.42	194.33	175.79	22.87	13.26	0.975
Lluvias									
M1	7.02	6.91	7.46	0.64	118.45	125.44	19.03	11.03	0.76
M1	7.05	6.76	7.50	0.66	129.03	106.40	19.74	11.45	0.815
M1	6.92	6.63	7.45	0.62	140.435	104.55	21.02	12.21	0.915
M2	7.05	6.79	7.54	0.43	115.92	98.22	16.68	9.67	0.8
M2	6.97	6.65	7.57	0.40	122.63	124.17	21.11	12.24	0.755
M2	6.90	6.55	7.62	0.51	122.81	136.70	20.97	12.16	0.865
M3	6.97	6.97	7.55	0.51	122.23	87.40	17.87	10.36	0.76
M3	6.89	6.89	7.65	0.68	135.76	102.48	19.48	11.31	0.855
M3	6.78	6.78	7.64	0.61	149.64	113.14	20.31	11.78	0.89

#### 5. Cationes extractables (acetato de amonio) en suelo por temporadas

Temporada	cmol(+)/Kg					PSI
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	CIC	PSI %
Secas						
M1	40.74	29.45	4.04	1.62	55.2	2.94
M1	42.23	32.93	3.94	1.4	53.74	2.61
M1	41.24	32.62	3.93	0.98	50.11	1.96
M2	42.29	30.87	4.11	1.47	49.57	2.96
M2	38.93	27.47	4.21	1.53	52.04	2.94
M2	37.52	26	4.5	1.18	54.15	2.18
M3	42.34	29.38	3.63	1.14	48.72	2.33
M3	40.04	28.28	5.04	1.46	51.94	2.81
M3	40.04	29.3	4.62	1.2	52.85	2.27

Lluvias	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	CIC	PSI %
M1	37.29	26.4	2.67	0.53	56.72	0.94
M1	37.43	27.44	2.99	0.51	60.91	0.84
M1	36.74	26.51	2.72	0.58	62.54	0.93
M2	38.05	23.61	2.55	0.44	56.63	0.78
M2	36.57	22.52	3.07	0.41	58.65	0.71
M2	38.41	19.61	3.19	0.52	60.94	0.85
M3	38.47	23.68	2.49	0.58	59.76	0.97
M3	37.3	22.65	2.82	0.56	58.86	0.95
M3	35.76	22.42	4.16	0.61	58.71	1.03

## 6. Cationes y aniones en pasta de saturación por temporadas

Temporada	Cationes pasta de saturación					Aniones pasta de saturación			
<b>Secas</b>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
M1	1.15	2.76	10.45	14.85	19.73	7.12	0.14	43.49	1.85
M1	0.90	3.11	10.33	16.19	20.87	7.20	0.20	46.34	2.29
M1	1.30	3.23	10.18	16.31	20.31	7.80	0.26	45.21	1.76
M2	1.22	3.11	7.59	11.41	13.40	4.37	0.04	31.78	2.57
M2	1.25	2.81	7.47	9.62	11.95	5.14	0.26	26.11	2.29
M2	1.34	3.86	8.70	12.15	14.62	6.03	0.25	33.95	1.58
M3	1.02	2.16	7.41	8.09	10.44	4.27	0.18	24.80	2.48
M3	1.64	4.32	9.60	11.46	13.48	7.78	0.43	31.52	2.28
M3	1.15	3.29	8.37	11.49	13.64	6.51	0.22	33.27	1.37
<b>Lluvia</b>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
M1	1.31	1.67	3.58	8.21	8.84	1.63	4.31	18.18	0.94
M1	1.13	1.54	2.33	5.90	6.59	0.83	0.28	14.39	1.52
M1	1.03	1.41	2.31	5.39	5.96	0.65	0.18	12.85	1.19
M2	0.59	0.90	0.96	3.68	3.53	0.55	0.14	8.43	1.39
M2	0.90	1.19	0.93	3.44	3.26	0.65	0.14	7.07	1.25
M2	1.23	1.55	1.26	4.94	4.80	0.71	0.12	11.16	1.27
M3	0.70	1.03	1.20	5.18	4.86	0.37	0.27	10.06	1.66
M3	0.60	0.97	0.70	3.55	3.17	0.44	0.28	7.19	1.43
M3	0.69	2.62	1.01	3.68	3.37	2.37	0.24	6.99	1.07

## 7. Calendario de manejo de la parcela

2013	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Ene.		R			R				R				C	C	C	C	C															
Feb.										A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A									
Mar.			S	S	S	S	S				R			L/P	R/P	L				R			R/L		L	R/L			R/L		R	
Abr.	M1	P	P	R/L	L/P	R/P		L	R	L			R		L	R			L	R		R/L	M2		P	R/L/P				R/L		
May.				R/L		R	L		R		P	L/P	P/M3	C	C/P	C/P	C/P	C/P	C	P	P	P	P	S	S/P	S/P	S	S				
Jun.		P	R	L		R/L	P	P	L/P	P	P	L				R	L	P	P	P	L/P	P		L			P		L			
Jul.	R	L/P	P		L/P		P	P	L/P	P			P	L/P	P	P		P	L/P	P	P	L/P	P		P	L	P	P	P	P	C/P	C/P
Ago.	C	C	C	P		P	P	S/P	S/P	S/P	S	S/P	P	P	P			L/P	P		P		L/P	P	P	P			L/P	P	P	

SeP.	P	P/M1	L/P	P	P	L/P	P	P	P	L/P		P	L/P	P	P	P	L	P	P/M2	P	P	L	P	P	P	L	P	P	
Oct.	L	R		P	P	P/M3	P	P				C	C	C	C	C	P	P	P		P	P	P	S	S	S/P	S	S	P
Nov.		R	P		R	P	P	P		P	P				R	P	P				P	P					R		
Dic.		R		R		R		R		R		R		R		R		R		R		R		P		R			

**Simbología**

- M Muestreo material vegetal y suelo
- P Precipitación
- R Riego
- L Lectura
- C Cosecha
- S Siembra
- A Aplicación de Abono y Acondicionamiento

Cosechas 2013	Fechas				Días de duración del cultivo
1	09	Marzo	14	Mayo	67
2	31	Mayo	29	Julio	62
3	13	Agosto	12	Octubre	61
4	30	octubre	12	enero	75

### 8. Porcentajes de recuperación de metales en suelo y planta

Metal	Intervalo de % de recuperación	
	suelo	Planta
Cd	95,9 – 91,9	94,5 – 113,3
Cr	77,7 – 87,8	ND
Cu	92,2 – 97,3	106,7 – 110,2
Fe	89,5 – 100,9	ND
Mn	80,1 – 84,4	91,8 – 93,6
Pb	93,8 – 104,0	86,0 – 102,9
Zn	70,4 – 96,7	84,9 – 100,0
Estandar certificado	Sn Joaquín Soil NIST-2709	Spinach Leaves NIST-1570 a
Datos comparados con material de referencia		
ND		
No Disponible el material de referencia no lo reporta		

### 9. Concentración de metales en organismos adultos por temporadas

Concentración de metal extraído por un organismo adulto en temporada de secas							
Hoja	Cromo mg	Cadmio mg	Cobre mg	Hierro mg	Manganeso mg	Plomo mg	Zinc mg
Promedio	0,387	0,958	48,526	792,386	106,665	0,816	385,104
DS	0,262	0,256	0,886	9,382	1,356	0,262	3,471
Raíz	Cromo mg	Cadmio mg	Cobre mg	Hierro mg	Manganeso mg	Plomo mg	Zinc mg
Promedio	0,347	0,267	11,544	564,240	29,036	1,025	77,508
DS	0,173	0,072	1,175	56,125	1,545	0,111	12,164
Planta	Cromo mg	Cadmio mg	Cobre mg	Hierro mg	Manganeso mg	Plomo mg	Zinc mg
Promedio	0,73	1,22	60,07	1356,63	135,70	1,84	462,61
DS	0,43	0,33	2,06	65,51	2,90	0,37	15,63



concentración de metal extraído por un organismo adulto en temporada de lluvias							
Hoja	Cromo mg	Cadmio mg	Cobre mg	Hierro mg	Manganeso mg	Plomo mg	Zinc mg
Promedio	0,986	0,338	70,953	2634,906	101,509	3,321	213,229
DS	0,437	0,388	0,640	27,505	1,352	0,422	16,005
Raíz	Cromo mg	Cadmio mg	Cobre mg	Hierro mg	Manganeso mg	Plomo mg	Zinc mg
Promedio	0,180	0,081	11,474	383,337	19,337	0,450	59,423
DS	0,192	0,067	1,365	3,503	1,959	0,197	29,111
Planta	Cromo mg	Cadmio mg	Cobre mg	Hierro mg	Manganeso mg	Plomo mg	Zinc mg
Promedio	1,17	0,42	82,43	3018,24	120,85	3,77	272,65
DS	0,63	0,45	2,01	31,01	3,31	0,62	45,12

## 10. Factor de transferencia y translocación de metales

Concentración de metales totales y fracciones biodisponibles en suelo mg/kg								
Metal	secas				Lluvias			
	total	soluble	intercambiable	sol+inter	total	soluble	interc.	sol+inter
Cd	0.364+0.04	0.013+0.002	0.035+0.01	0.048+0.01	0.355+0.04	0.014+0.001	0.039+0.006	0.053+0.007
Pb	21.759+5.2	0.027+0.007	0.086+0.10	0.113+0.02	22.747+5.4	0.031+0.005	0.102+0.009	0.133+0.014
Cr	48.923+2.4	0.012+0.003	0.026+0.005	0.038+0.008	50.553+1.4	0.030+0.010	0.044+0.004	0.074+0.014
Cu	31.521+1.8	0.012+0.003	0.026+0.002	0.038+0.005	31.681+1.9	0.114+0.011	0.211+0.022	0.326+0.03
Zn	97.846+20.4	0.576+0.122	1.401+0.2	1.976+0.3	94.820+18.7	1.275+0.3	2.164+0.4	3.439+0.7
Mn	383.895+37.5	1.275+0.241	15.644+2.4	16.920+2.6	442.916+37.9	2.173+0.5	43.266+4.8	45.439+5.307
Fe	11,312.969+475.2	4.752+2.718	8.9588+1.7	13.711+4.356	11,204.247+437.4	14.264+1.915	37.206+5.8	51.470+7.7

Concentración de metales bio-acumulados en la planta adulta mg/kg						
Metal	secas			lluvias		
	Hoja	Raíz	Hoja+Raíz	Hoja	Raíz	Hoja+Raíz
Cd	0.168+0.010	0.312+0.03	0.480+0.04	0.060+0.004	0.094+0.009	0.154+0.01
Pb	0.143+0.015	1.199+0.07	1.342+0.09	0.588+0.04	0.526+0.1	1.113+0.2
Cr	0.068+0.016	0.405+0.1	0.473+0.1	0.174+0.05	0.210+0.1	0.385+0.2
Cu	8.519+0.6	13.491+1.1	22.011+1.8	12.551+0.3	13.406+1.3	25.957+1.6
Zn	67.609+3.2	90.584+12.1	158.194+15.3	37.720+15.6	69.426+29.0	107.145+44.7
Mn	18.726+1.1	33.935+1.5	52.661+2.6	17.957+0.97	22.592+1.9	40.549+2.9
Fe	139.113+9.136	659.432+56.1	798.545+65.2	466.107+27.1	447.863+3.5	913.970+30.6

## 11. Fraccionamiento de metales en suelo

Profundidad cm	Cadmio	Solubles	Intercambiables	Carbonatos	Oxidos de Mn	Materia Org	Oxidos Fe Amorfos	Oxidos Fe Cristalinos	Residual	Recuperación
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%
0-20		0.020	0.054	0.023	0.018	0.142	0.027	0.016	0.067	98.999
20-30		0.017	0.013	0.022	0.025	0.147	0.014	0.018	0.056	94.932
30-63		0.020	0.047	0.014	0.008	0.041	0.009	0.010	0.067	137.372
63-90		0.021	0.013	0.013	0.017	0.062	0.014	0.012	0.060	140.106
90-95		0.024	0.067	0.014	0.013	0.015	0.010	0.005	0.065	76.957

<b>Plomo</b>	Solubles	Intercambiables	Carbonatos	Oxidos de Mn	Materia Org	Oxidos Fe amorfos	Oxidos Fe Cristalinos	Residual	Recuperación
Profundidad	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%
0-20	0.039	0.153	0.218	0.303	9.238	1.958	1.420	3.651	79.563
20-30	0.031	0.115	0.203	0.356	7.437	1.870	2.167	7.485	90.387
30-63	0.020	0.500	0.046	0.091	0.636	0.865	0.627	4.525	61.313
63-90	0.019	0.132	0.081	0.092	1.566	0.698	0.299	2.983	64.612
90-95	0.021	0.053	0.328	0.082	0.770	0.855	0.136	9.529	61.505

<b>Cobre</b>	Solubles	Intercambiables	Carbonatos	Oxidos de Mn	Materia Org	Oxidos Fe Amorfos	Oxidos Fe Cristalinos	Residual	Recuperación
Profundidad cm	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%
0-20	0.068	1.001	0.269	0.098	4.113	3.531	1.080	8.321	75.480
20-30	0.081	1.692	0.224	0.104	3.563	3.426	1.039	8.289	75.573
30-63	0.025	1.194	0.027	0.087	1.688	2.107	0.505	7.869	80.965
63-90	0.050	0.582	0.041	0.127	2.395	1.918	1.332	6.680	79.085
90-95	0.057	1.057	0.010	0.084	0.902	0.907	0.408	13.078	86.211

<b>Cromo</b>	Solubles	Intercambiables	Carbonatos	Oxidos de Mn	Materia Org	Oxidos Fe Amorfos	Oxidos Fe Cristalinos	Residual	Recuperación
Profundidad cm	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%
0-20	0.022	0.035	0.184	0.298	0.017	0.003	0.007	39.107	64.468
20-30	0.016	0.043	0.240	0.318	0.020	0.003	0.007	39.290	67.385
30-63	0.002	0.048	0.146	0.229	0.014	0.003	0.006	58.723	66.640
63-90	0.016	0.039	0.146	0.313	0.019	0.002	0.007	28.924	72.777
90-95	0.001	0.000	0.075	0.158	0.007	0.001	0.001	13.177	91.621

<b>Zinc</b>	Solubles	Intercambiables	Carbonatos	Oxidos de Mn	Materia Org	Oxidos Fe Amorfos	Oxidos Fe Cristalinos	Residual	Recuperación
Profundidad	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%
0-20	0.129	0.523	0.524	0.978	29.529	13.146	18.205	26.017	109.872
20-30	0.130	0.502	0.447	0.791	28.121	13.599	17.243	28.528	89.432
30-63	0.394	0.878	0.039	0.022	4.793	3.953	13.167	34.427	137.310
63-90	0.369	0.927	0.058	0.143	4.884	9.324	9.389	18.969	102.767
90-95	0.381	0.567	1.168	1.149	5.179	7.630	9.240	59.805	128.760

<b>Manganeso</b>	Solubles	Intercambiables	Carbonatos	Oxidos de Mn	Materia Org	Oxidos Fe amorfos	Oxidos Fe Cristalinos	Residual	Recuperación
Profundidad cm	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%
0-20	1.307	11.378	14.102	21.213	53.221	9.248	12.538	194.046	108.074
20-30	0.983	9.330	14.672	22.588	52.367	8.203	13.048	195.464	107.158
30-63	1.203	8.368	0.579	2.778	10.166	3.246	9.576	225.791	113.406
63-90	0.825	9.870	0.766	9.739	18.648	1.201	3.070	118.131	93.616
90-95	0.894	10.840	0.687	1.418	3.946	0.528	1.223	327.031	118.874

Hierro	Solubles	Intercambiables	Carbonatos	Oxidos de Mn	Materia Org	Oxidos Fe amorfos	Oxidos Fe Cristalinos	residual	Recuperación
Profundidad cm	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%
0-20	12.070	48.872	7.545	10.146	485.156	1236.826	426.312	11283.196	97.848
20-30	11.796	36.058	3.764	13.769	483.305	1138.531	411.861	12129.033	88.905
30-63	11.027	44.454	18.058	9.907	408.278	996.421	504.778	14622.305	98.915
63-90	13.179	56.438	1.126	6.584	2408.032	1259.025	64.562	7200.333	119.174
90-95	4.733	24.248	5.028	19.929	184.951	123.105	86.003	18931.107	110.656

## 12. Resultados de la prueba t-Student para determinar diferencias entre temporadas realizadas a los diferentes parámetros medidos en suelo

Parámetros determinados en suelo									
Secas vz Lluvias	pH	C%	N%	COD mg/L	CIC cmol/Kg	PSI PSI/CIC	POR mV	Temperatura °C	Lluvia mm
P Value	0.0004	0.0701	0.1135	< 0.0001	< 0.0001	0.0004	0.0142	0.0188	0.0034
Dif. Sig.	Si	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Cationes y aniones medidos en pasta de saturación											
Secas vz Lluvias	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	pH	CE
P Value	0.0378	0.0006	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.8247	< 0.0001	0.002	0.0004	< 0.0001
Dif. Sig.	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si

## 13. Resultados del análisis multivariante para determinar diferencias en la concentración del metal entre estadios vegetativos y órganos en diferentes temporadas

### Diferencia de cromo entre órganos y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Plantula</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-0.0250	-0.1953 to 0.1453	No	ns	0.9770
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-0.0510	-0.2213 to 0.1193	No	ns	0.8416
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	0.0110	-0.1593 to 0.1813	No	ns	0.9979
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	-0.0260	-0.1963 to 0.1443	No	ns	0.9743
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.0360	-0.1343 to 0.2063	No	ns	0.9362
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	0.0620	-0.1083 to 0.2323	No	ns	0.7484
<b>Juvenil</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-0.3800	-0.5503 to -0.2097	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-0.0980	-0.2683 to 0.07231	No	ns	0.4043
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-0.1320	-0.3023 to 0.03831	No	ns	0.1699
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	0.2820	0.1117 to 0.4523	Yes	***	0.0007
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.2480	0.07769 to 0.4183	Yes	**	0.0027
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-0.03400	-0.2043 to 0.1363	No	ns	0.9454
<b>Adulto</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-0.3370	-0.5073 to -0.1667	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-0.1060	-0.2763 to 0.06431	No	ns	0.3372
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-0.1420	-0.3123 to 0.02831	No	ns	0.1261
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	0.2310	0.06069 to 0.4013	Yes	**	0.0052
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.1950	0.02469 to 0.3653	Yes	*	0.0206
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-0.0360	-0.2063 to 0.1343	No	ns	0.9362

### Diferencia de cromo entre estadios y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Hojas Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	0.0200	-0.1342 to 0.1742	No	ns	0.9439
Plántula vs. Adulto	0.01200	-0.1422 to 0.1662	No	ns	0.9794
Juvenil vs. Adulto	-0.008000	-0.1622 to 0.1462	No	ns	0.9908
<b>Hojas Lluvias</b>					
Plántula vs. Juvenil	-0.02700	-0.1812 to 0.1272	No	ns	0.9004
Plántula vs. Adulto	-0.0430	-0.1972 to 0.1112	No	ns	0.7678
Juvenil vs. Adulto	-0.01600	-0.1702 to 0.1382	No	ns	0.9637
<b>Raíces Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	-0.3350	-0.4892 to -0.1808	Yes	****	< 0.0001
Plántula vs. Adulto	-0.3000	-0.4542 to -0.1458	Yes	***	0.0002
Juvenil vs. Adulto	0.0350	-0.1192 to 0.1892	No	ns	0.8388
<b>Raíces Lluvias</b>					
Plántula vs. Juvenil	-0.1230	-0.2772 to 0.03117	No	ns	0.1358
Plántula vs. Adulto	-0.1410	-0.2952 to 0.01317	No	ns	0.0775
Juvenil vs. Adulto	-0.01800	-0.1722 to 0.1362	No	ns	0.9543

### Diferencia de cadmio entre organos y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Plantula</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-0.1470	-0.1815 to -0.1125	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	0.0350	0.0004592 to 0.06954	Yes	*	0.0462
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	0.008000	-0.02654 to 0.04254	No	ns	0.9183
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	0.1820	0.1475 to 0.2165	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.1550	0.1205 to 0.1895	Yes	****	< 0.0001
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-0.0270	-0.06154 to 0.007541	No	ns	0.1644
<b>Juvenil</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-0.1400	-0.1745 to -0.1055	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	0.1140	0.07946 to 0.1485	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	0.0770	0.04246 to 0.1115	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	0.2540	0.2195 to 0.2885	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.2170	0.1825 to 0.2515	Yes	****	< 0.0001
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-0.0370	-0.07154 to -0.002459	Yes	*	0.0326
<b>Adulto</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-0.1440	-0.1785 to -0.1095	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	0.1080	0.07346 to 0.1425	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	0.0740	0.03946 to 0.1085	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	0.2520	0.2175 to 0.2865	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.2180	0.1835 to 0.2525	Yes	****	< 0.0001
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-0.0340	-0.06854 to 0.0005408	No	ns	0.0548

### Diferencia de cadmio entre estadios y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Hojas Secas</b>					
Plántula vs. Juveni	-0.0860	-0.1173 to -0.05473	Yes	****	< 0.0001
Plántula vs. Adulto	-0.07800	-0.1093 to -0.04673	Yes	****	< 0.0001
Juveni vs. Adulto	0.008000	-0.02327 to 0.03927	No	ns	0.8003
<b>Hojas Lluvias</b>					
Plántula vs. Juveni	-0.007000	-0.03827 to 0.02427	No	ns	0.8428
Plántula vs. Adulto	-0.005000	-0.03627 to 0.02627	No	ns	0.9162
Juveni vs. Adulto	0.0020	-0.02927 to 0.03327	No	ns	0.9860
<b>Raíces Secas</b>					
Plántula vs. Juveni	-0.07900	-0.1103 to -0.04773	Yes	****	< 0.0001
Plántula vs. Adulto	-0.0750	-0.1063 to -0.04373	Yes	****	< 0.0001
Juveni vs. Adulto	0.004000	-0.02727 to 0.03527	No	ns	0.9454

<b>Raíces Lluvias</b>					
Plántula vs. Juveni	-0.0170	-0.04827 to 0.01427	No	ns	0.3783
Plántula vs. Adulto	-0.01200	-0.04327 to 0.01927	No	ns	0.6096
Juveni vs. Adulto	0.005000	-0.02627 to 0.03627	No	ns	0.9162

### Diferencia de cobre entre organos y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Plantula</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-1.696	-3.324 to -0.06818	Yes	*	0.0390
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-0.02700	-1.655 to 1.601	No	ns	> 0.9999
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-0.6980	-2.326 to 0.9298	No	ns	0.6432
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	1.669	0.04118 to 3.297	Yes	*	0.0430
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.9980	-0.6298 to 2.626	No	ns	0.3500
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-0.6710	-2.299 to 0.9568	No	ns	0.6708
<b>Juvenil</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-5.503	-7.131 to -3.875	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-4.272	-5.900 to -2.644	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-4.995	-6.623 to -3.367	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	1.231	-0.3968 to 2.859	No	ns	0.1862
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.5080	-1.120 to 2.136	No	ns	0.8247
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-0.7230	-2.351 to 0.9048	No	ns	0.6174
<b>Adulto</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-4.972	-6.600 to -3.344	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-4.032	-5.660 to -2.404	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-4.887	-6.515 to -3.259	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	0.9400	-0.6878 to 2.568	No	ns	0.4013
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.08500	-1.543 to 1.713	No	ns	0.9989
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-0.8550	-2.483 to 0.7728	No	ns	0.4826

### Diferencia de cobre entre estadios y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Hojas Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	-2.308	-3.782 to -0.8344	Yes	**	0.0018
Plántula vs. Adulto	-2.494	-3.968 to -1.020	Yes	***	0.0008
Juvenil vs. Adulto	-0.1860	-1.660 to 1.288	No	ns	0.9468
<b>Hojas Lluvias</b>					
Plántula vs. Juvenil	-6.553	-8.027 to -5.079	Yes	****	< 0.0001
Plántula vs. Adulto	-6.499	-7.973 to -5.025	Yes	****	< 0.0001
Juvenil vs. Adulto	0.05400	-1.420 to 1.528	No	ns	0.9954
<b>Raíces Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	-6.115	-7.589 to -4.641	Yes	****	< 0.0001
Plántula vs. Adulto	-5.770	-7.244 to -4.296	Yes	****	< 0.0001
Juvenil vs. Adulto	0.3450	-1.129 to 1.819	No	ns	0.8296
<b>Raíces Lluvias</b>					
Plántula vs. Juvenil	-6.605	-8.079 to -5.131	Yes	****	< 0.0001
Plántula vs. Adulto	-6.683	-8.157 to -5.209	Yes	****	< 0.0001
Juvenil vs. Adulto	-0.07800	-1.552 to 1.396	No	ns	0.9904

### Diferencia de hierro entre organos y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Plantula</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-480.1	-529.9 to -430.3	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-7.431	-57.23 to 42.37	No	ns	0.9759
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-133.3	-183.1 to -83.46	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	472.7	422.9 to 522.5	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	346.9	297.1 to 396.7	Yes	****	< 0.0001
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-125.8	-175.6 to -76.03	Yes	****	< 0.0001

<b>Juvenil</b>						
Hojas secas vs. Raíces secas	-516.5	-566.3 to -466.7	Yes	****		< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-289.4	-339.2 to -239.6	Yes	****		< 0.0001
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-281.5	-331.3 to -231.7	Yes	****		< 0.0001
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	227.1	177.3 to 276.9	Yes	****		< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	235.0	185.2 to 284.8	Yes	****		< 0.0001
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	7.905	-41.89 to 57.70	No	ns		0.9713
<b>Adulto</b>						
Hojas secas vs. Raíces secas	-520.3	-570.1 to -470.5	Yes	****		< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-327.0	-376.8 to -277.2	Yes	****		< 0.0001
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-308.8	-358.5 to -259.0	Yes	****		< 0.0001
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	193.3	143.5 to 243.1	Yes	****		< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	211.6	161.8 to 261.4	Yes	****		< 0.0001
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	18.24	-31.55 to 68.04	No	ns		0.7448

### Diferencia de hierro entre estadios y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Hojas Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	-22.87	-67.95 to 22.21	No	ns	0.4271
Plántula vs. Adulto	-21.41	-66.49 to 23.67	No	ns	0.4726
Juvenil vs. Adulto	1.454	-43.63 to 46.53	No	ns	0.9964
<b>Hojas Lluvias</b>					
Plántula vs. Juvenil	-304.8	-349.9 to -259.8	Yes	****	< 0.0001
Plántula vs. Adulto	-341.0	-386.1 to -295.9	Yes	****	< 0.0001
Juvenil vs. Adulto	-36.14	-81.22 to 8.936	No	ns	0.1333
<b>Raíces Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	-59.21	-104.3 to -14.13	Yes	**	0.0086
Plántula vs. Adulto	-61.62	-106.7 to -16.54	Yes	**	0.0062
Juvenil vs. Adulto	-2.412	-47.49 to 42.67	No	ns	0.9902
<b>Raíces Lluvias</b>					
Plántula vs. Juvenil	-171.1	-216.2 to -126.0	Yes	****	< 0.0001
Plántula vs. Adulto	-196.9	-242.0 to -151.8	Yes	****	< 0.0001
Juvenil vs. Adulto	-25.80	-70.89 to 19.28	No	ns	0.3421

### Diferencia de manganeso entre organos y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Plantula</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-11.82	-15.83 to -7.817	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-1.711	-5.718 to 2.296	No	ns	0.6462
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-3.470	-7.477 to 0.5372	No	ns	0.1064
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	10.11	6.106 to 14.12	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	8.354	4.347 to 12.36	Yes	****	< 0.0001
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-1.759	-5.766 to 2.248	No	ns	0.6261
<b>Juvenil</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-15.72	-19.73 to -11.71	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	0.7080	-3.299 to 4.715	No	ns	0.9612
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-2.808	-6.815 to 1.199	No	ns	0.2413
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	16.43	12.42 to 20.44	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	12.91	8.906 to 16.92	Yes	****	< 0.0001
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-3.516	-7.523 to 0.4912	No	ns	0.1000
<b>Adulto</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-15.21	-19.22 to -11.20	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	0.7690	-3.238 to 4.776	No	ns	0.9511
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-3.866	-7.873 to 0.1412	No	ns	0.0614
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	15.98	11.97 to 19.99	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	11.34	7.336 to 15.35	Yes	****	< 0.0001
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-4.635	-8.642 to -0.6278	Yes	*	0.0192

### Diferencia de manganeso entre estadios y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Hojas Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	-6.028	-9.656 to -2.400	Yes	**	0.0010
Plántula vs. Adulto	-6.271	-9.899 to -2.643	Yes	***	0.0007
Juvenil vs. Adulto	-0.2430	-3.871 to 3.385	No	ns	0.9847
<b>Hojas Lluvias</b>					
Plántula vs. Juvenil	-3.609	-7.237 to 0.01862	No	ns	0.0514
Plántula vs. Adulto	-3.791	-7.419 to -0.1634	Yes	*	0.0393
Juvenil vs. Adulto	-0.1820	-3.810 to 3.446	No	ns	0.9914
<b>Raíces Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	-9.925	-13.55 to -6.297	Yes	****	< 0.0001
Plántula vs. Adulto	-9.656	-13.28 to -6.028	Yes	****	< 0.0001
Juvenil vs. Adulto	0.2690	-3.359 to 3.897	No	ns	0.9813
<b>Raíces Lluvias</b>					
Plántula vs. Juvenil	-5.366	-8.994 to -1.738	Yes	**	0.0031
Plántula vs. Adulto	-6.667	-10.29 to -3.039	Yes	***	0.0003
Juvenil vs. Adulto	-1.301	-4.929 to 2.327	No	ns	0.6482

### Diferencia de plomo entre organos y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Plantula</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-0.4680	-0.6299 to -0.3061	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-0.1310	-0.2929 to 0.03089	No	ns	0.1432
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-0.1700	-0.3319 to -0.008112	Yes	*	0.0371
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	0.3370	0.1751 to 0.4989	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.2980	0.1361 to 0.4599	Yes	***	0.0002
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-0.0390	-0.2009 to 0.1229	No	ns	0.9093
<b>Juvenil</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-0.9850	-1.147 to -0.8231	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-0.3860	-0.5479 to -0.2241	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-0.4080	-0.5699 to -0.2461	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	0.5990	0.4371 to 0.7609	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.5770	0.4151 to 0.7389	Yes	****	< 0.0001
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-0.02200	-0.1839 to 0.1399	No	ns	0.9816
<b>Adulto</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-1.056	-1.218 to -0.8941	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	-0.4450	-0.6069 to -0.2831	Yes	****	< 0.0001
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-0.3830	-0.5449 to -0.2211	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	0.6110	0.4491 to 0.7729	Yes	****	< 0.0001
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	0.6730	0.5111 to 0.8349	Yes	****	< 0.0001
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	0.06200	-0.09989 to 0.2239	No	ns	0.7185

### Diferencia de plomo entre estadios y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Hojas Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	-0.03000	-0.1766 to 0.1166	No	ns	0.8666
Plántula vs. Adulto	-0.04300	-0.1896 to 0.1036	No	ns	0.7467
Juvenil vs. Adulto	-0.01300	-0.1596 to 0.1336	No	ns	0.9733
<b>Hojas Lluvias</b>					
Plántula vs. Juvenil	-0.2850	-0.4316 to -0.1384	Yes	***	0.0002
Plántula vs. Adulto	-0.3570	-0.5036 to -0.2104	Yes	****	< 0.0001
Juvenil vs. Adulto	-0.07200	-0.2186 to 0.07455	No	ns	0.4493
<b>Raíces Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	-0.5470	-0.6936 to -0.4004	Yes	****	< 0.0001
Plántula vs. Adulto	-0.6310	-0.7776 to -0.4844	Yes	****	< 0.0001
Juvenil vs. Adulto	-0.08400	-0.2306 to 0.06255	No	ns	0.3412

Raíces Lluvias					
Plántula vs. Juvenil	-0.2680	-0.4146 to -0.1214	Yes	***	0.0004
Plántula vs. Adulto	-0.2560	-0.4026 to -0.1094	Yes	***	0.0006
Juvenil vs. Adulto	0.01200	-0.1346 to 0.1586	No	ns	0.9772

### Diferencia de zinc entre organos y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Plantula</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-9.478	-41.57 to 22.61	No	ns	0.8469
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	3.344	-28.74 to 35.43	No	ns	0.9915
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-20.51	-52.60 to 11.58	No	ns	0.3150
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	12.82	-19.27 to 44.91	No	ns	0.6916
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	-11.03	-43.12 to 21.06	No	ns	0.7794
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-23.85	-55.94 to 8.235	No	ns	0.1981
<b>Juvenil</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-19.28	-51.37 to 12.81	No	ns	0.3672
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	27.23	-4.857 to 59.32	No	ns	0.1167
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	0.6940	-31.39 to 32.78	No	ns	> 0.9999
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	46.51	14.42 to 78.60	Yes	**	0.0028
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	19.97	-12.12 to 52.06	No	ns	0.3372
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-26.54	-58.62 to 5.551	No	ns	0.1307
<b>Adulto</b>					
Hojas secas vs. Raíces secas	-22.98	-55.06 to 9.112	No	ns	0.2251
Hojas secas vs. Hojas Lluvias	29.89	-2.198 to 61.98	No	ns	0.0742
Hojas secas vs. Raíces Lluvias	-1.817	-33.90 to 30.27	No	ns	0.9986
Raíces secas vs. Hojas Lluvias	52.86	20.78 to 84.95	Yes	***	0.0007
Raíces secas vs. Raíces Lluvias	21.16	-10.93 to 53.25	No	ns	0.2893
Hojas Lluvias vs. Raíces Lluvias	-31.71	-63.79 to 0.3814	No	ns	0.0536

### Diferencia de zinc entre estadios y temporadas

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
<b>Hojas Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	-33.37	-62.42 to -4.322	Yes	*	0.0222
Plántula vs. Adulto	-36.62	-65.67 to -7.574	Yes	*	0.0117
Juvenil vs. Adulto	-3.252	-32.30 to 25.80	No	ns	0.9579
<b>Hojas Lluvias</b>					
Plántula vs. Juvenil	-9.484	-38.53 to 19.56	No	ns	0.6973
Plántula vs. Adulto	-10.08	-39.12 to 18.97	No	ns	0.6662
Juvenil vs. Adulto	-0.5930	-29.64 to 28.45	No	ns	0.9986
<b>Raíces Secas</b>					
Plántula vs. Juvenil	-43.17	-72.22 to -14.12	Yes	**	0.0030
Plántula vs. Adulto	-50.12	-79.17 to -21.07	Yes	***	0.0007
Juvenil vs. Adulto	-6.949	-36.00 to 22.10	No	ns	0.8228
<b>Raíces Lluvias</b>					
Plántula vs. Juvenil	-12.17	-41.22 to 16.88	No	ns	0.5558
Plántula vs. Adulto	-17.93	-46.98 to 11.12	No	ns	0.2900
Juvenil vs. Adulto	-5.763	-34.81 to 23.28	No	ns	0.8741



## 14. Resultados del análisis multivariante para determinar diferencias entre la concentración de metales en suelo de la fracción soluble e intercambiable entre temporadas

### Cadmio

Sidak's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
Soluble:Secas vs. Soluble:Lluvia	-0.0003500	-0.002177 to 0.001477	No	ns	0.9956
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Secas	-0.00931	-0.01114 to -0.007483	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-0.01056	-0.01239 to -0.008733	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Secas	-0.00896	-0.01079 to -0.007133	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Lluvia	-0.01021	-0.01204 to -0.008383	Yes	****	< 0.0001
Intercambiable:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-0.00125	-0.003077 to 0.0005774	No	ns	0.3280

### Cromo

Sidak's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
Soluble:Secas vs. Soluble:Lluvia	-0.0181	-0.02635 to -0.009851	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Secas	-0.01381	-0.02206 to -0.005561	Yes	***	0.0003
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-0.03198	-0.04023 to -0.02373	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Secas	0.004290	-0.003959 to 0.01254	No	ns	0.6347
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Lluvia	-0.01388	-0.02213 to -0.005631	Yes	***	0.0003
Intercambiable:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-0.01817	-0.02642 to -0.009921	Yes	****	< 0.0001

### Cobre

Sidak's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
Soluble:Secas vs. Soluble:Lluvia	-0.1024	-0.1191 to -0.08563	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Secas	-0.01372	-0.03045 to 0.003014	No	ns	0.1577
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-0.1993	-0.2161 to -0.1826	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Secas	0.08864	0.07191 to 0.1054	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Lluvia	-0.09696	-0.1137 to -0.08023	Yes	****	< 0.0001
Intercambiable:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-0.1856	-0.2023 to -0.1689	Yes	****	< 0.0001

### Hierro

Sidak's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
Soluble:Secas vs. Soluble:Lluvia	-9.512	-14.06 to -4.963	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Secas	-4.206	-8.755 to 0.3426	No	ns	0.0825
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-32.45	-37.00 to -27.90	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Secas	5.305	0.7565 to 9.854	Yes	*	0.0154
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Lluvia	-22.94	-27.49 to -18.39	Yes	****	< 0.0001
Intercambiable:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-28.25	-32.80 to -23.70	Yes	****	< 0.0001

### Manganeso

Sidak's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
Soluble:Secas vs. Soluble:Lluvia	-0.8971	-4.434 to 2.640	No	ns	0.9807
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Secas	-14.37	-17.90 to -10.83	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-41.99	-45.53 to -38.45	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Secas	-13.47	-17.01 to -9.934	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Lluvia	-41.09	-44.63 to -37.56	Yes	****	< 0.0001
Intercambiable:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-27.62	-31.16 to -24.09	Yes	****	< 0.0001

## Plomo

Sidak's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
Soluble:Secas vs. Soluble:Lluvia	-0.004282	-0.01485 to 0.006285	No	ns	0.8414
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Secas	-0.05973	-0.07029 to -0.04916	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-0.07537	-0.08594 to -0.06481	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Secas	-0.05544	-0.06601 to -0.04488	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Lluvia	-0.07109	-0.08166 to -0.06052	Yes	****	< 0.0001
Intercambiable:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-0.01565	-0.02622 to -0.005081	Yes	**	0.0014

## Zinc

Sidak's multiple comparisons test	Mean Diff.	95% CI of diff.	Significant?	Summary	Adjusted P Value
Soluble:Secas vs. Soluble:Lluvia	-0.6995	-1.072 to -0.3270	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Secas	-0.8249	-1.197 to -0.4524	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-1.588	-1.961 to -1.216	Yes	****	< 0.0001
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Secas	-0.1253	-0.4978 to 0.2472	No	ns	0.9263
Soluble:Lluvia vs. Intercambiable:Lluvia	-0.8888	-1.261 to -0.5163	Yes	****	< 0.0001
Intercambiable:Secas vs. Intercambiable:Lluvia	-0.7635	-1.136 to -0.3910	Yes	****	< 0.0001