



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Área Académica de Química

Tesis para obtener el grado de

**Doctor en Ciencias
Ambientales**

**“Causas medioambientales
que producen efecto
de rechazo sobre el cultivo
de cebada maltera
(*Hordeum distichum* L.)”**

Presenta: L.Q. A. Judith Prieto Méndez

Julio 2011

Directores de Tesis: Dr. Francisco Prieto García
Dra. Alma Delia Román Gutiérrez

Comité Tutorial:

Dr. Alberto José Gordillo Martínez
Dr. Cesar Abelardo González Ramírez
Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval





El presente trabajo fue realizado en el Área Académica de Química, adscrita al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI), dentro del Programa Educativo del Doctorado en Ciencias Ambientales y en colaboración con el Cuerpo Académico de Ciencias Ambientales.





Judith Prieto Méndez, agradece el apoyo brindado por parte del CONACyT por la beca otorgada (Nº de becario 216385) durante 42 meses para el desarrollo del presente trabajo.

Dedicatorias y agradecimientos.

A Dios.

A Dios, por ser nuestro creador, amigo, amparo y fortaleza cuando más lo necesitamos, por regalarme estos cuatro años que hoy reflejan los primeros frutos de muchos que espero que vengan, y por hacer palpable su amor a través de cada uno de los que me rodeó en este camino.

A mi esposo.

Por soportar este tiempo y seguir ahí, y por hacerme saber a cada momento que siempre cuento con él. Gracias. Te amo.

A mis padres.

A mis padres, por el solo hecho de serlo, gracias, por siempre estar allí, que sin esperar nada a cambio, han sido ayuda en mi camino, y por ser el motor de cada motivación y así forman parte de este logro que es nuestro. Les amo.

A mis asesores y comité tutorial.

Gracias por su tiempo, gracias por sus consejos, por su ayuda en este largo caminar, por compartir sus conocimientos conmigo, por motivarme y ayudarme a adquirir y acercarme a un conocimiento que antes no tenía y por ayudarme en cada momento a superarme en lo intelectual y en lo personal, Gracias.

Dedicatorias y agradecimientos.

Cuando la sabiduría entrare en tu corazón, y la ciencia fuere grata a tu alma, la discreción te guardará; te preservará la inteligencia, para librarte del mal camino, de los hombres que hablan perversidades.

Proverbios 2:10-12.

Porque mejor es la sabiduría que las piedras preciosas; y todo cuanto se puede desear, no es de compararse con ella.

Proverbios 8:11.

Índice

	Pág.
Índice de tablas	vi
Índice de figuras	x
Resumen y Abstract	xvi
I. Introducción.	1
I.1. Introducción	1
I.2. Fundamentación del estudio	2
I.3. Bibliografía	3
II. Generalidades de los suelos.	6
II.1. El suelo. Introducción	6
II.1.1. La fase sólida del suelo. Composición y perfiles del suelo	8
II.1.2. La fase líquida del suelo	14
II.1.3. La fase gaseosa del suelo	16
II.2. Principales propiedades físicas y fisicoquímicas del suelo	17
II.2.1. Textura, densidad, granulometría y estructura de suelos	19
II.2.2. Medida de la salinidad en suelos. Conductividad eléctrica	25
II.2.3. pH, potencial redox y potencial zeta de los suelos	26
II.2.4. Materia orgánica, nutrientes esenciales y no esenciales	29
II.2.5. Capacidad de intercambio iónico (CIC).	30
II.3. Agua y su relación con la agricultura.	33
II.3.1. Características de los suelos que afectan el movimiento de las aguas.	33
II.3.2. Coloides del suelo y la retención de iones	36

II.4. Uso de indicadores e índices para evaluación de calidad de los Suelos (ICS)	38
II.5. Bibliografía	40
III. El cultivo de cebada (<i>Hordeum sativum</i> Jess.)	45
III.1. El cultivo de cebada. Generalidades.	45
III.2. Producción y productividad de la cebada en el Estado de Hidalgo	50
III.3. Efectos del suelo. Incidencia en la producción de cebada	51
III.4. Presencia de metales en los cultivos	56
III.4.1. Manganeseo en los cultivos	59
III.4.2. Níquel en los cultivos	60
III.4.3. Cobre en los cultivos	60
III.4.4. Zinc en los cultivos	61
III.4.5. Molibdeno en los cultivos	61
III.4.6. Cadmio en los cultivos	61
III.4.7. Plomo en los cultivos	62
III.5. Fitotoxicidad por la presencia de metales	63
III.6. Clasificación de los cultivos con relación al riesgo alimentario	65
III.7. Cebada calidad no maltera. Otras potencialidades de usos.	67
III.8. Bibliografía	67
IV. Objetivos	71
IV.1. Objetivos Generales	71
IV.2. Objetivos Específicos	71

V. Metodología experimental	72
V.1. Área de estudio. Localización.	72
V.2. Muestras. Obtención y preparación.	73
V.2.1. Muestras de plantas y suelos.	73
V.2.2. Preparación de las muestras de suelos y plantas para los análisis.	77
V.3. Estudios del cultivo de cebada en macetas.	77
V.4. Análisis de caracterización de suelos.	79
V.4.1. pH (potenciometría) en extracto de saturación de suelo.	79
V.4.2. Conductividad (conductimetría) en extracto de saturación de suelo.	79
V.4.3. Potencial redox (potenciometría) en extracto de saturación de suelo.	80
V.4.4. Potencial Zeta (potenciometría) en extracto de saturación de suelo.	80
V.4.5. Humedad (gravimetría) en suelo.	80
V.4.6. Materia orgánica en suelo. Método de Walkley y Black.	81
V.4.7. Nitrógeno total en suelo. Método Kjeldahl.	83
V.4.8. Textura de los suelos. Método Bouyoucos.	84
V.4.9. Saturación de bases en muestras de suelos.	85
V.4.10. Agregados estables en muestras de suelos.	85
V.4.11. Velocidad de infiltración en muestras de suelos.	86
V.4.12. Densidad aparente en muestras de suelos.	86
V.4.13. Digestión de las muestras de suelos y análisis de metales.	88
V.5. Análisis de los lixiviados obtenidos del riego en macetas.	88

V.6. Análisis proximales y de metales por órganos de las plantas recolectadas en cosechas y metales bioacumulados por órganos del cultivo por etapas de desarrollo en los ensayos en macetas.	88
V.6.1. Análisis de humedad	89
V.6.2. Determinación de cenizas	90
V.6.3. Determinación de grasas	90
V.6.4. Determinación de proteínas	90
V.6.5. Determinación de fibras	90
V.6.6. Determinación de carbohidratos	91
V.6.7. Poder germinativo	91
V.6.8. Análisis de metales	92
V.7. Establecimiento del uso de indicadores e índices para evaluación rápida de calidad de los suelos cebaderos del sur del estado de Hidalgo	92
V.8. Establecimiento del uso de indicadores e índices para evaluación rápida de calidad para el cultivo de cebada maltera (ICCM) del sur del estado de Hidalgo	93
V.9. Análisis estadísticos y evaluación de resultados.	94
V.10. Bibliografía	94
VI. Resultados y discusión.	97
VI.1. Resultados de los estudios de caracterización de suelos.	97
VI.2. Conclusiones de los estudios de caracterización de suelos.	109
VI.3. Evaluación de indicadores e índices de calidad de suelos (ICS) Cebaderos	110
VI.4. Ensayos en macetas.	117
VI.4.1. Caracterización de cultivos por etapas de desarrollo y órganos de la planta.	117

VI.4.2. Análisis de lixiviados y de suelos al término de los estudios en macetas.	129
VI.5. Conclusiones de los estudios en macetas.	132
VI.6. Análisis proximales por órganos de la planta cultivada en parcelas y por municipios.	133
VI.7. Conclusiones de los estudios de caracterización de cultivos cosechados en parcelas.	145
VI.8. Evaluación de indicadores e índices de calidad para cultivo de cebada maltera (ICCM)	146
VI.9. Análisis de correlaciones estadísticas	153
VI.9.1. Correlaciones en suelos	153
VI.9.2. Correlaciones en cultivo de cebada	160
VI.10. Bibliografía	166
VII. Conclusiones generales	171
VIII. Logros y Perspectivas	175



Índice de tablas

Tabla	Pág
II.1 Evolución del perfil del suelo.	9
II.2 Agrupamiento de tetraedros de silicio, y nombres de los grandes grupos de silicatos.	10
II.3 Composición del aire del suelo	17
II.4 Valores normales de C.E., para diferentes tipos de agua.	26
II.5 Capacidad de intercambio catiónico de algunos materiales particulados que son comunes en suelos	32
III.1 Principales países productores a nivel mundial en cebada de temporal, ciclo primavera-verano. México ocupó el lugar 54 en el año 2009.	45
III.2 Composición del grano de cebada por 100 g.	49
III.3 Composición de la paja por 100 g.	50
III.4 Composición de la cebada verde por 100 g.	50
III.5 Resultados de siembra y cosecha de cebada en los años 2006-2009 en el estado de Hidalgo. Primavera-Verano, sistema de riego Temporal.	50
III.6 Minerales (mg/100g) presentes en granos de las diferentes variedades de cebada (desviación estándar).	58
III.7 Contenidos de algunos metales reportados en granos de cebada, calculados en base seca	63
III.8 Concentraciones de Cd, Mn, Ni y Pb para varias especies de tejidos de hojas maduras.	65
III.9 Contenidos máximos permitidos en Pb, Cd y Hg en algunos alimentos, según la Unión Europea (mg kg^{-1}), en base de peso seco.	66
III.10 Grupo de metales y metaloides según biodisponibilidad y riesgo para la cadena alimentaria.	67



V.1	Características de las regiones de estudio del estado de Hidalgo, México	73
V.2	Tamaños de población (N) y tamaños de muestras (n) para suelos, por Municipios y parcelas.	77
V.3	Condiciones experimentales para los ensayos en macetas.	78
V.4	Clasificación de suelos según el pH.	79
V.5	Clasificación de suelos por evaluación de la salinidad, medida a partir de la conductividad eléctrica en los extractos de saturación.	79
V.6	Parámetros de potencial Redox.	80
V.7	Clasificación de suelos en base a los contenidos de materia orgánica según sean suelos volcánicos o no volcánicos.	82
V.8	Clasificación de suelos en función del contenido de nitrógeno para suelos volcánicos y suelos no volcánicos.	84
VI.1	pH, potencial redox (Eh) y potencial Zeta (pZ) en extractos de saturación de los suelos en estudio. (Desviación estándar).	98
VI.2	pH, Conductividad eléctrica (CE) y porcentaje de humedad de los suelos en estudio. (Desviación estándar).	99
VI.3	Texturas de los suelos de los municipios en estudio. (Desviación estándar).	100
VI.4	Materia orgánica (MO) de los suelos en estudio. Comparación del método del dicromato y el método del permanganato de potasio. (Desviación estándar).	100
VI.5	Materia orgánica (MO) de los suelos en estudio (método del permanganato de potasio) y capacidad de intercambio catiónico (CIC). (Desviación estándar).	101
VI.6	Metales de los suelos en estudio y porcentajes de cenizas. (Desviación estándar).	101
VI.7	Relaciones de concentraciones promedios de cationes intercambiables, asociados a los valores de CIC.	103
VI.8	Metales en suelos por FRX. Composición en óxidos básicos (%m/m), metales en estudio (mg/kg) y otros metales (mg/kg).	104



VI.9	Otros parámetros medidos en los suelos en estudio.	106
VI.10	Indicadores propuestos para evaluación de calidad de suelos (ICS) cebaderos.	110
VI.11	Clases de calidad de suelos.	113
VI.12	Indicadores e índices de calidad de suelos (ICS) por Municipios	113
VI.13	Relación de la estabilidad de una suspensión coloidal en función de los valores del potencial Zeta (pZ).	115
VI.14	Humedades por etapas de desarrollo y órganos del cultivo. A) Sembrado en suelos de Almoloya (% m/m).	118
VI.14	Humedades por etapas de desarrollo y órganos del cultivo. B) Sembrado en suelos de Apan (% m/m).	118
VI.14	Humedades por etapas de desarrollo y órganos del cultivo. C) Sembrado en suelos de Emiliano Zapata (% m/m).	119
VI.15	Evaluación del tamaño final (altura en cm) del cultivo en los experimentos realizados en maceta.	119
VI.16	Características físicas del cultivo de la cebada, en la etapa final “Llenado de granos” en los ensayos en macetas con riegos.	120
VI.17	Metales en suelos de los municipios por FRX. Óxidos básicos (%m/m), metales en estudio (mg/kg) y otros metales (mg/kg), riego con agua.	128
VI.18	Metales en suelos de los municipios por FRX. Óxidos básicos (%m/m), metales en estudio (mg/kg) y otros metales (mg/kg), riegos con agua contaminada con Ni ²⁺ .	128
VI.19	Metales en suelos de los municipios por FRX. Óxidos básicos (%m/m), metales en estudio (mg/kg) y otros metales (mg/kg), riegos con agua contaminada con Pb ²⁺ .	130
VI.20	Humedad en cultivo de cebada por órganos. Municipio Almoloya.	136
VI.21	Humedad en cultivo de cebada por órganos. Municipio Apan.	137
VI.22	Humedad en cultivo de cebada por órganos. Municipio Emiliano Zapata.	137



VI.23	Humedad promedio del follaje en su totalidad (%)	137
VI.24	Por ciento de cenizas por órganos del cultivo de cebada en el municipio de Almoloya.	138
VI.25	Por ciento de cenizas por órganos del cultivo de cebada en el municipio de Apan.	139
VI.26	Por ciento de cenizas por órganos del cultivo de cebada en el municipio de E. Zapata.	139
VI.27	Por ciento de Nitrógeno y proteína por órganos del cultivo de cebada en el municipio de Almoloya.	141
VI.28	Por ciento de Nitrógeno y proteína por órganos del cultivo de cebada en el municipio de Apan.	141
VI.29	Por ciento de Nitrógeno y proteína por órganos del cultivo de cebada en el municipio de E. Zapata.	141
VI.30	Por ciento de grasa en granos del cultivo de cebada en el municipio de Almoloya.	142
VI.31	Por ciento de fibras por órgano del cultivo de cebada en el municipio Almoloya.	142
VI.32	Por ciento de fibras por órgano del cultivo de cebada en el municipio Apan.	142
VI.33	Por ciento de fibras por órgano del cultivo de cebada en el municipio E. Zapata.	142
VI.34	Por ciento de carbohidratos por órganos del cultivo.	143
VI.35	Indicadores propuestos para evaluación de calidad de los granos de cebada maltera.	147
VI.36	Clases de calidad de granos para cebada maltera.	147
VI.37	Indicadores e índices de calidad de granos de cebada maltera (ICCM) por municipios.	148
VI.38	Germinación, test de índigo-carmín y test de tetrazolio por municipio y su comparación con la germinación natural.	150



VI.39	Regresiones lineales en los test colorimétricos. Análisis del porcentaje de embriones vivos por procedencias (p = nivel de significación).	150
VI.40	Germinación, test del peróxido de hidrógeno y test del ácido sulfúrico por municipio y su comparación con la germinación natural.	152
VI.41	Regresiones lineales en los test de germinación. Análisis del porcentaje de embriones vivos por procedencias. (p = nivel de significación).	152

Índice de figuras

Figura		Pág
II.1	Composición porcentual de las fases del suelo.	6
II.2	Fases del suelo.	7
II.3	Perfiles del suelo.	10
II.4	Tetraedro de silicio aislado, y en red hexagonal. Dibujo esquemático mostrando: (a) un tetraedro SiO_4^{4-} aislado y (b) capas de tetraedros dispuestos en red hexagonal.	11
II.5	Octaedro de aluminio aislado, y hoja de unidades octaédricas.(a) unidad octaédrica aislada y (b) hoja de unidades octaédricas.	11
II.6	Estructura de los minerales en función del modelo de repetición de las láminas.	12
II.7	Espacio poroso por donde circula la fase líquida en el suelo.	15
II.8	Escalas granulométricas, Internacional, y del USDA.	19
II.9	Triangulo de Texturas.	20
II.10	Estado de agregación de los perfiles superficiales de un suelo.	23
II.11	Intercambio de H^+ producido por las precipitaciones.	27
II.12	Clasificación de los suelos para los cultivos en función del pH.	28



II.13	Esquema representativo de los procesos de intercambio iónico donde se aprecian las disociaciones de los grupos OH ⁻ y grupos -COOH.	32
II.14	Relación entre la textura del suelo y la disponibilidad de agua.	34
II.15	Los cationes son atraídos por las arcillas y la materia orgánica del suelo; Los aniones en cambio son repelidos.	37
III.1	Etapas del desarrollo y crecimiento de la cebada (<i>Hordeum distichon</i> L).	46
III.2	Espiga de <i>Hordeum distichon</i> L. (cebada cervecera), a la izquierda y espiga de <i>Hordeum hexastichon</i> L. (cebada forrajera), a la derecha.	48
III.3	Índices de bioacumulación (IBA) de diversos elementos traza en plantas verdes y hongos. El IBA fue calculado como la relación de elementos traza contenidos en plantas y hongos, respecto a la concentración en los suelos.	57
III.4	Respuesta de las plantas al estrés por deficiencia y toxicidad de elementos traza. a) Elementos traza esenciales, b) Elementos traza no esenciales.	64
III.5	Patrones de crecimiento o rendimiento en función de la concentración de nutrientes y elementos tóxicos en cultivos (Tomado con modificaciones de Chen, 2000). A) Patrón tipo I, B) Patrón tipo II y C) Patrón tipo III.	65
V.1	Mapa general de ubicación de la zona a estudiar. Municipios de Apan, Almoloya y Emiliano Zapata. Ubicación de los puntos de muestreos en la zona de estudio. Municipio de Almoloya (Parcelas P1, P2 y P3); municipio de Apan (Parcelas P4 y P5) y municipio Emiliano Zapata (Parcelas P6 y P7).	72
V.2	Forma general de recolección o toma de muestras de suelos y plantas en cada una de las parcelas por cada Municipio.	73
V.3	Esquema de presentación de ensayos en macetas	78
V.4	Esquema representativo del estudio de bioacumulación de metales en macetas para cultivos de cebada.	78
V.5	Esquema representativo de la distribución de semillas sembradas en macetas.	79



V.6	Ensayo para la determinación de velocidad de infiltración de agua en suelos.	87
V.7	Ensayo para determinación de densidad aparente en suelos	87
VI.1	Correlaciones entre valores promedios de a) pH y Eh y b) pH y pZ.	98
VI.2	Variaciones del pZ a diferentes pH de los extractos de saturación de suelos	99
VI.3	Variaciones de a) pH y Conductividad eléctrica (CE) y b) pH y % H ₂ O en suelos.	100
VI.4	Metales en suelos y su correspondencia con los contenidos porcentuales de cenizas.	102
VI.5	Correspondencia de los valores de relaciones entre metales y CIC para los diferentes suelos en estudio.	103
VI.6	Espectro EDS por MEB de suelos en los inicios de los ensayos en macetas. A) Suelo del Municipio de Almoloya.	108
VI.6	Espectro EDS por MEB de suelos en los inicios de los ensayos en macetas. B) Suelo del Municipio de Apan.	108
VI.6	Espectro EDS por MEB de suelos en los inicios de los ensayos en macetas. C) Suelo del Municipio de Emiliano Zapata	108
VI.7	Microfotografías obtenidas por MEB de los suelos en los inicios de los ensayos en macetas	109
VI.8	Variaciones de los potenciales Zeta (pZ) a diferentes concentraciones de sales en medios acuosos	116
VI.9	Contenidos de Na ⁺ en raíz, por suelos y etapas del cultivo en los ensayos en macetas. A) Riego con agua.	120
VI.9	Contenidos de Na ⁺ en raíz, por suelos y etapas del cultivo en los ensayos en macetas. B) Riego con agua contaminada con Ni ²⁺ .	121
VI.9	Contenidos de Na ⁺ en raíz, por suelos y etapas del cultivo en los ensayos en macetas. C) Riego con agua contaminada con Pb ²⁺ .	121
VI.10	Contenidos de Na ⁺ en grano, por suelos y etapas del cultivo en los ensayos en macetas. A) Riego con agua.	122



VI.10	Contenidos de Na^+ en grano, por suelos y etapas del cultivo en los ensayos en macetas. B) Riego con agua contaminada con Ni^{2+} .	122
VI.10	Contenidos de Na^+ en grano, por suelos y etapas del cultivo en los ensayos en macetas. C) Riego con agua contaminada con Pb^{2+} .	123
VI.11	Contenidos de K^+ en raíz, por suelos y etapas del cultivo en los ensayos en macetas. A) Riego con agua.	123
VI.11	Contenidos de K^+ en raíz, por suelos y etapas del cultivo en los ensayos en macetas. B) Riego con agua contaminada con Ni^{2+} .	124
VI.11	Contenidos de K^+ en raíz, por suelos y etapas del cultivo en los ensayos en macetas. C) Riego con agua contaminada con Pb^{2+} .	124
VI.12	Contenidos de K^+ en granos.	125
VI.13	Contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} en granos. Riego con agua.	126
VI.14	Contenidos de Ca^{2+} y Mg^{2+} en granos. Riego con agua contaminada con Ni^{2+} .	126
VI.15	Contenidos de Ni^{2+} en raíz, hojas y granos. Riego con agua contaminada con Ni^{2+} .	127
VI.16	Contenidos de Pb^{2+} en raíz, hojas y granos. Riego con agua contaminada con Pb^{2+} .	128
VI.17	Comportamiento del Ca^{2+} en lixiviados obtenidos del riego con agua en los ensayos en macetas.	131
VI.18	Comportamiento del Mg^{2+} en lixiviados obtenidos del riego con agua en los ensayos en macetas.	131
VI.19	Comportamiento del Na^+ en lixiviados obtenidos del riego con agua en los ensayos en macetas.	132
VI.20	Parcelas del municipio de Almoloya. Parcela P1, La Vega; a la derecha la parcela P2, El Sabinal; parcela P3, La Peña.	134
VI.21	Parcelas del municipio de Apan. Parcela P4 del Tio Chano; parcela P5, La Panadera.	135



VI.22	Parcelas del municipio de Emiliano Zapata. Parcela P6; Parcela P7.	135
VI.23	Otras incidencias durante la recolección de muestras.	136
VI.24	Bioacumulación de sodio por órganos del cultivo en promedio y por municipios.	144
VI.25	Bioacumulación de calcio por órganos del cultivo en promedio y por municipios.	144
VI.26	Bioacumulación de magnesio por órganos del cultivo en promedio y por municipios.	145
VI.27	Fotografías de las semillas sometidas a los test colorimétricos. a) Control positivo; b) Control negativo.	151
VI.28	Análisis comparativos entre los test colorimétricos y germinativos para evaluar la facultad germinativa en semillas de cebada maltera.	153
VI.29	Correlación de densidades de suelos con las texturas y la materia orgánica.	154
VI.30	Correlaciones entre propiedades electroquímicas en los extractos de saturación de suelos.	155
VI.31	Correlaciones entre las formas de sales evaluadas en los extractos de saturación de suelos.	156
VI.32	Correlaciones entre humedades, texturas y capacidades de intercambio catiónico.	157
VI.33	Correlaciones entre contenidos de metales sodio, potasio, calcio y magnesio y los contenidos de cenizas.	158
VI.34	Correlaciones entre contenidos de metales tóxicos plomo y níquel y las capacidades de intercambio catiónico.	159
VI.35	Correlaciones entre contenidos de metales evaluados por fluorescencia de rayos X.	160
VI.36	Correlaciones en contenidos de humedad por órganos del cultivo y por cada municipio.	161
VI.37	Correlaciones en contenidos de % de cenizas por órganos del cultivo y por cada municipio.	161



VI.38	Correlaciones en contenidos de % de proteínas por órganos del cultivo y por cada municipio.	162
VI.39	Correlaciones en contenidos de % de grasas por órganos del cultivo y por cada municipio.	163
VI.40	Correlaciones en contenidos de % de fibras por órganos del cultivo y por cada municipio.	163
VI.41	Correlaciones en contenidos de % de carbohidratos por órganos del cultivo y por cada municipio.	164
VI.42	Correlaciones en contenidos de metales Ca^{2+} y Mg^{2+} por órganos del cultivo y por cada municipio.	164
VI.43	Correlaciones en contenidos de metales Na^+ y K^+ por órganos del cultivo y por cada municipio.	165
VI.44	Correlaciones en contenidos de metales Pb^{2+} y Ni^{2+} por órganos del cultivo y por cada municipio.	165

Resumen

El objetivo central del presente estudio fue realizar una evaluación integral de suelos y cultivos de cebada maltera (*Hordeum distichum* L.) en los municipios de Almoloya, Apan y Emiliano Zapata, todos productores de altos rendimientos en el sur del estado de Hidalgo. Así como de correlacionar aquellas causas generales y medio ambientales que propician una posible reducción en los rendimientos e incrementos de rechazo de la producción por incumplimiento de las normativas de comercialización. En este trabajo se ha logrado proponer indicadores e índice de calidad para los suelos cebaderos y el cultivo de cebada maltera.

El trabajo está estructurado en capítulos. En el primer capítulo se hace una introducción relativa al cultivo de la cebada (*Hordeum distichum* L.) en general y a la calidad de los suelos destinados a este cultivo. El segundo capítulo trata de generalidades de los suelos como sus fases, interacciones, propiedades físicas y fisicoquímicas de los mismos y detallar acerca de lo reportado hasta el momento sobre indicadores e índices para evaluar la calidad de los mismos. Todo lo concerniente al cultivo de cebada maltera se trata en el tercer capítulo. Se recopila información relativa de este cultivo sus niveles de producción y productividad en el estado de Hidalgo y su comparación a nivel nacional. Se aborda el tema acerca de los efectos que pueden ocasionar a la cebada calidad maltera, las propiedades del suelo y la presencia de metales que pueden llegar a órganos de la planta. El cuarto capítulo comprende los objetivos generales y específicos que fueron el propósito de esta investigación. En el quinto capítulo se recoge la metodología experimental que se llevo a cabo en todo el estudio. Se establece como propuesta una metodología para el uso de indicadores e índices que permitan realizar una evaluación rápida de la calidad de los suelos cebaderos (ICS) y el establecimiento y uso de indicadores e índices para evaluación rápida de calidad para el cultivo de cebada maltera (ICCM). El capítulo seis recoge todo lo relativo a los resultados obtenidos y discusión de los mismos. Se presentan todos los análisis de caracterización relacionados de los suelos y sus calidades por cada municipio estudiado. Posteriormente se aborda todo lo relativo a las evaluaciones en macetas, lo relacionado a los análisis proximales de caracterización del cultivo y finalmente los criterios de correlaciones estadísticas. El capítulo siete fue destinado para las conclusiones y en el capítulo ocho se indican los logros y perspectivas de este trabajo.

Se señala que en los suelos de la región, en el horizonte A los contenidos de materia orgánica (MO) son muy bajos y se trata de suelos de textura poco arcillosa. Los valores de pH los clasifican como neutros a moderadamente ácidos, característicos y favorables para el cultivo de cebada, con alto contenido de nutrientes principales como calcio, magnesio y más bajo, potasio. El caso particular de los suelos del municipio de Emiliano Zapata resultan excedidos en calcio y más bajos en potasio lo que resulta perjudicial para el rendimiento del cultivo en las parcelas estudiadas de este municipio. Los valores de potencial redox (Eh), indicaron que son suelos reductores intermedios, característica que corresponde con suelos de bajas concentraciones de sales disueltas en la fase acuosa. El municipio E. Zapata

resultó ser el de suelos más salinos a pesar de las bajas concentraciones de potasio pero sí elevadas en calcio.

Los contenidos bajos de arcilla y de MO en estos suelos, provocan baja retención de agua y baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) con lo cual no son óptimamente aprovechados los nutrientes principales. También aunado a ello el uso del suelo con monocultivo, propicia que bajen los contenidos de arcilla, y como consecuencia las CIC disminuyan, provocando también posibles lixiviados de nutrientes a horizontes más profundos donde no llegan las raíces del cultivo y se afecta así la absorción de nutrientes y los rendimientos por hectáreas del cultivo. Las bajas CIC se asocian también a las bajas concentraciones de MO. Es necesario valorar las necesidades de incremento en MO disponible y biodegradable.

La baja retención de humedad de estos suelos, provoca poca germinación al inicio del cultivo y poca mineralización y humidificación de la MO. El grano de cebada requiere para su germinación absorber un 40 % de humedad para una adecuada formación de la radícula y MO orgánica disponible.

De los ensayos en maceta se resume que los metales como níquel y plomo, utilizados como agentes contaminantes en las aguas, presentaron una tendencia a ser absorbidos más ampliamente por la raíz (más el plomo que el níquel); esto permitió apreciar una mayor migración de plomo a otros órganos del cultivo, se tubo concentraciones importantes de éste en grano. Esto puede considerarse una afectación que limitaría la calidad del cultivo para la producción de malta y cerveza (rechazo de la producción por la industria maltera).

Sobre los estudios del cultivo cosechado en la región se determinó cuáles de sus constituyentes presentan algún contenido relevante que afecte a la calidad del producto; entre ellos destacan los valores de baja retención de humedad en granos, altos contenidos en cenizas, asociados a altos contenidos de óxidos metálicos, bajos niveles de potasio en granos y desproporciones entre contenidos de K/Mg en hojas. Los resultados indican también un mayor grado de madurez en las cosechas (y secado natural) en el municipio de Apan, que en los municipios de Almoloya y E. Zapata. Este criterio coincide con los resultados de los suelos y sus calidades en los municipios, siendo los de menor calidad los de E. Zapata.

Los niveles de absorción de minerales en el cultivo de los tres municipios resultaron muy elevados y al parecer se produce al comienzo de la fase vegetativa, por aplicaciones de fertilizantes y algunas prácticas de encalado, corroborado por los altos contenidos se cenizas. Se han encontrado valores que en suma varían entre 21-30%, es decir entre 5 y 6 veces superiores a las cifras de cenizas reportadas como normales. Los contenidos de nitrógeno proteico, a pesar de contar con valores idóneos para los granos de cebada con calidad maltera, pueden ser debidos a las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados durante la etapa vegetativa ya que no fueron encontrados en suelos. Debe destacarse que por las características franco arenosas de los

suelos, el N no es fácilmente retenido en el suelo pero si puede ser bioacumulado en los inicios del desarrollo de la planta.

Los contenidos en fibras, grasas y carbohidratos en granos del cultivo pueden considerarse sin afectaciones y normales. Sin embargo en cuanto a contenidos metálicos se concluye que los niveles de sodio y calcio resultan elevados. Resultando en contraste los niveles de potasio despreciables, observado en todos los órganos del cultivo; esta carencia de potasio provoca una disminución en la calidad cervecera y una disminución a la resistencia al encamado de las variedades cultivadas. Las afectaciones al rendimiento en las cosechas por fisiopatías de encamado se deban no a los niveles de nitrógeno en el cultivo, sino a la carencia de potasio.

Los indicadores propuestos y utilizados para evaluar la calidad del suelo (ICS), integran información de variables asociadas, incorporan indicadores físicos, químicos y fisicoquímicos, y son de fácil medición. Los resultados representan una instantánea para la situación de los años 2007–2010 en los suelos cebaderos del sur del estado de Hidalgo. El ICS promedio de los suelos de esta región fue de 0.50 lo cual lo ubica en la clase 3, de moderada calidad según la metodología propuesta. Este valor está fuertemente influenciado por los bajos valores de carbono orgánico disponible (COS), como la propiedad que más está afectando estos suelos. Esta disminución del COS resulta la causa principal también de los valores bajos de estabilidad de agregados e infiltración y un indicador de los valores de baja densidad aparente. Estos cambios en las propiedades físicas afectan la condición superficial del suelo provocando un incremento de los procesos de erosión, con la consiguiente pérdida de espesor del horizonte superficial.

Es la primera ocasión que se reportan indicadores e Índices de Calidad en Cebadas Malteras (ICCM) y la aplicación de una metodología para evaluaciones rápidas de estos indicadores, se concluye que el indicador que presentó el menor valor en promedio para los tres municipios, fue el porcentaje de humedad de los granos (0.43), influenciado principalmente por los suelos con menor capacidad de retención de agua. El mayor valor correspondió a los contenidos de materia grasa (0.91), considerándose como valores de muy buena calidad. El promedio general de la calidad de los granos de cebada maltera en la región es de ICCM=0.69, no hay diferencias significativas entre los tres municipios. El peso hectolitro, contenidos en proteínas y fibras dietéticas, clasifican de moderada a buena calidad. Con relación al poder de germinación los granos clasifican de buena a muy alta calidad; los granos cosechados en el municipio de E. Zapata, resultaron ser los menos viables (porcentaje). Los métodos colorimétricos ofrecieron mejores resultados que los métodos germinativos para evaluar la facultad germinativa de las semillas de cebada. El método de tinción con índigo carmín puede ser utilizado en sustitución del método del tetrazolio por cuanto ofrece mejores resultados, más precisos y representa menor costo de reactivo y mayor estabilidad de la solución que se prepara.

Abstract

The central aim of the present study was to realize an integral evaluation of soils and cultures of barley maltera (*Hordeum distichum* L.) in the municipalities of de Almoloya, Apan and Emiliano Zapata, all producers of high performances in the south of the state of Hidalgo. So as to correlate those general and environmental causes that leads to a possible reduction in yields and the increased to the reject of the production for breach of the rules of marketing. In this work we have managed to propose indicators and quality index for the soils and for the cultivation of malting barley.

This paper is divided into chapters. The first chapter is an introduction in general about cultivation of barley (*Hordeum distichum* L.) and the quality of soil for this crop. The second chapter is an overview of soils and their phases, interactions, physical and physicochemical properties of these and itemize about what has been reported by some authors about indicators and benchmarks to assess their quality. Everything about the malting barley crop is in the third chapter. It collects information on the crop production levels and productivity in the state of Hidalgo and compared nationally. Addresses the question about the effects that can lead to quality malting barley, soil properties and the presence of metals that can reach the plant organs. The fourth chapter covers the general and specific objectives that were the purpose of this research. In the fifth chapter analyzes the experimental methodology that took place throughout the study. Proposal is set as a methodology for the use of indicators and indices that permit a rapid assessment of quality of the soil for culture of barley (soil quality index, SQI) and the establishment and use of indicators and indices for rapid assessment malting barley cultivation (index malting quality barley, QIMB). The sixth chapter contains everything related to the results and discussion. We present all related characterization analysis of soils and their clasifications for each municipality. Next, is consider all matters relating to assessments in pots, as related to proximal characterization analysis of the crop and finally the criteria for statistical correlations. Chapter seven was appointed to the conclusions and in chapter eight shows the achievements and prospects of this work.

In summary it is noted that in the soils of the region the organic matter content (OM), in the (A) horizon is very low, and they are soils of textured lightly clayey. The values of pH are classified like neutrally to moderately acid, and this characteristics are favorable for growing barley, With high in key nutrients like calcium and magnesium but low in potassium . The particular case of the soils in the municipality of Emiliano Zapata is exceed in calcium but more lower in potassium which is detrimental to crop yield in the plots studied in this municipality. Redox potential values (Eh) indicated that soils are intermediate reducers; characteristic that corresponds with soils of low concentrations dissolved salts in the aqueous phase. The municipality E. Zapata was found they is the more saline soil than the rest of the municipals, in spite of low levels of potassium but because high in calcium.

The low contents of clay and organic matter in these soils, are the cause of low retention of water and low cation exchange capacity (CEC), with which are not optimally utilized primary nutrients, coupled with with land use how a

monocropping, leads a lower clay content, and consequently the decrease CEC, also causing potential leaching of nutrients to deeper horizons where it is more difficult to reach the crop roots and thus affects nutrient uptake and crop yields per hectare. The low CEC is also associated with low concentrations of OM. It is necessary to assess the needs of increasing available and biodegradable OM.

The low moisture retention of these soils, is the cause of the low germination at planting and the low mineralization and humidification of the OM. The barley grain germination required absorb a 40% of humidity for adequate training of the radicle, and available organic OM.

Of the tests in pots is summarized that metals such as nickel and lead, used as contaminants in water, exist a tendency to be absorbed more fully by the root (more lead than nickel); this allowed to appreciate further migration of lead to other organs of the crop, was obtained a significant concentration of lead in grain. This can be considered an affectation that limits crop quality for malt and beer production (rejection of the malting industry production).

on the analysis made to crops at harvest time was determined which of its constituents have some relevant content that affect product quality, among them the values of low grain moisture retention, high ash content, associated with high contents of metal oxides, low potassium levels in grains and disproportions between the contents of K / Mg in leaves. Results also indicate a greater degree of maturity at harvest (and natural drying) in the municipalities of Apan, which in the municipalities of Almoloya and E. Zapata. This finding is consistent with the results of soil and soil quality in the municipality, being the lowest quality those of E. Zapata.

The absorption levels of minerals in the cultivation of the three municipalities were very high and apparently occurs at the beginning of the vegetative phase, but the applications of fertilizer and liming practices, this are corroborated by high ash contents. The are found values in range between 21-30%, ie 5 to 6 times higher than the figures reported as normal for ash in barley by some authors. The protein nitrogen content despite having the appropriate values for the grain of barley malting quality is considered, may be due to the application of nitrogen fertilizer during the vegetative stage, because they are not found in soils. It should be noted that in the characteristics of sandy loam soils, the N is not easily retained in the soil, but are it can be bioaccumulated in the early plant development.

The fiber content, fat and carbohydrates in grain of barley, can be considered without affectations and normals. However, in terms of metal content is concluded that sodium and calcium levels are high. Resulting in contrast the despicable levels of potassium, observed in all the organs of the cultivation; this lack of potassium, provokes a decrease in the beer quality and a decrease the resistance to being crushed of the cultivated varieties. The impacts on crop yields by plant diseases disorders of being crushed are due not to the levels of nitrogen in the cultivation, but if by of the lack of potassium.

The indicators proposed and used to be assess soil quality index (SQI), They integrate information from asociated variables, also incorporating physical indicators, chemical and physicochemical and of easily measured. All of these results represent a snapshot of the situation of the years 2007-2010 in soils of barley cultivation in state of Hidalgo.

The average SQI in this region were 0.50 which places him in Class 3, moderate quality according to the methodology. This value is strongly influenced by the low levels of available organic carbon (SOC), as the property that more is affecting these soils. This decrease in SOC is also the main cause of low values of aggregate stability and infiltration also an indicator of low bulk density values. These changes affect the physical properties of soil surface condition leading to increased erosion processes, with consequent loss of topsoil thickness.

It is the first time they are reported about indices and quality indicators of soil (SQI), and indices of quality in malting barley (MBQI) and about the application of a methodology for rapid assessment of these indicators, we conclude that the indicator having the lowest average for the three municipalities, was the moisture content of grains (0.43), mainly influenced by the soil with lower water retention capacity. The highest value corresponded to the fat content (0.91), regarded as high quality securities. The average of quality indices of malting barley in the region was MBQI = 0.69, no significant differences between the three municipalities. The hectoliter weight, protein content and dietary fiber, is classified moderate to good quality. With regard to the grain germination is classified from good to very high quality, except the grains harvested in the municipal of E. Zapata, there has been demonstrated that they are be less viable. With colorimetric methods they are have better results than the germination methods, for a evaluation of the germination and viability of seed of barley. The method of staining with indigo carmine can be used in Substitution of tetrazolium method, because that gives better results, being more accurate and represent a minor cost of reagents and increased stability of the solution prepared.

I. Introducción.

I.1. Introducción.

Las variedades de cebada son extraordinariamente diversas en México. De la especie y la variedad dependen las características para el tratamiento industrial de los granos, el método de elaboración a seguir y la idoneidad para elaborar determinados productos (Tscheuschner, 2001). Por ello, es necesario contar con variedades de elevados rendimientos en granos, para lo cual se han ideado modelos de genotipos morfológicos que no pueden ser iguales en distintas partes del mundo.

Las principales características que deben poseer las variedades modernas de cebada para obtener altos rendimientos en sus cosechas, han sido establecidas de una manera general (Hornsey, 1999).

Entre las variedades de cebadas malteras recomendadas en México, la más utilizada es la variedad Esmeralda (Impulsora agrícola, 2002). De las características de esta variedad, las más distintivas son: altura entre 0.85-1.05 m, espigas de tamaño mediano a largo, que se inclina un poco al madurar, con barba larga y aserrada. Su ciclo vegetativo es relativamente corto, resistente al desgrane y a las enfermedades. Es una de las primeras variedades desarrolladas en México para condiciones de temporal (Impulsora agrícola, 2002).

La cebada es uno de los cuatro cereales de mayor producción a nivel mundial (cuarto lugar), no es consumida por las personas en una aplicación directa. En ocasiones, cuando el grano de cebada no reúne las características para aplicaciones como en la elaboración de maltas y bebidas, debido a que alcanzan menos del 8% en proteínas, o sobrepasa el 12%, la cebada se destina simplemente al forraje y alimentación del ganado, disminuyendo su costo y utilidad (Márquez, 2006). El contenido de proteínas del grano es un factor determinante de la calidad maltera. Generalmente, no debe sobrepasar el 12% establecido en el estándar de comercialización (Savio, 1998). Esto requiere que las aplicaciones de fertilizante nitrogenado produzcan un rendimiento económicamente aceptable y también satisfagan los requerimientos de calidad para la industria maltera, de no ser así se produciría un importante pérdida (Lazari *et al.*, 2001). La búsqueda de nuevos valores agregados a los granos de cebada de calidad no maltera, como puede ser la obtención de bioproductos derivados de ésta, constituye un reto en la actualidad (SAGARPA, 2005).

El cultivo de cebada se ve favorecido en suelos fértiles, como todos los cultivos en general (<http://www.infoagro.com/herbaceos/forrajes/cebada>, 2010), pero pueden alcanzarse producciones elevadas y altos rendimientos por hectáreas en suelos que sean poco profundos, poco arcillosos o pedregosos incluso, también requiere de suelos con buena retención de humedad, sobretodo en el comienzo de su desarrollo. En general todas las plantas han desarrollado mecanismos altamente específicos para adaptarse a ciertas condiciones de los suelos, que les permita

absorber, transportar y acumular nutrientes (Lasat, 2000). Sin embargo, algunos metales y metaloides que no son precisamente nutrientes o simplemente, no esenciales para los tejidos, son absorbidos, traslocados y acumulados en la planta, debido a que presentan un comportamiento similar a los elementos nutritivos requeridos. Cuando algunos de estos elementos no son necesario y pueden bioacumularse en diferentes órganos de la planta, llegan a ser tóxicos y afectar la calidad del cultivo y que éste no resulte apto para el consumo.

I.2. Fundamentación del estudio

La calidad de un suelo abarca los componentes físicos, químicos y biológicos así como sus interacciones. Por esto, para captar la naturaleza holística de la calidad, o salud, del suelo, deberán ser medidos todos los parámetros. Sin embargo, no todos estos parámetros tienen la misma relevancia en todos los suelos, o situaciones actuales se refiere o cultivos específicos (USDA, 2000).

La alteración de las condiciones del suelo por las prácticas de manejo puede afectar la producción de los cultivos, a través de su influencia en la distribución de la materia orgánica, actividad microbiana y dinámica de nutrientes; y, por otro lado, modificando propiedades físicas del suelo como agregación y porosidad (Martens *et al.*, 1992; Salinas-García *et al.*, 1997; Díaz Zorita *et al.*, 2002; Ferreras *et al.*, 2007). Existe amplio consenso entre estos autores en identificar valores óptimos de parámetros de suelos, tales como la densidad aparente, la porosidad, el contenido de carbono orgánico y la capacidad de retención de agua del suelo, entre otros. Todos ellos pueden determinar la calidad física del suelo, con la finalidad de mejorar la productividad de los cultivos manteniendo a la vez la calidad ambiental (Reynolds *et al.*, 2002).

La calidad física de los suelos se refiere fundamentalmente a parámetros como resistencia mecánica, transmisión y almacenaje de fluidos en la zona de exploración de las raíces. Los suelos con buena calidad física deben tener características de almacenaje y transmisión de fluidos que permitan proporciones adecuadas de agua, nutrientes disueltos y aire como para promover el máximo desarrollo de los cultivos y una mínima degradación ambiental. Una estimación indirecta de la capacidad de almacenar agua y aire en la zona de exploración de las raíces es a través de la estabilidad de la estructura, debido a que este parámetro gobierna tanto los aspectos relacionados con la compactación, consolidación y compactación, como los vinculados con el almacenaje y movimiento de agua y aire (Reynolds *et al.*, 2002; Dexter, 2004; Ferreras *et al.*, 2007).

Una problemática frecuente es la aparición de defectos en cultivos y pasturas, definidos o caracterizados por un menor desarrollo de la parte aérea vegetal, su manifestación es más intensa en planas áreas o ligeramente deprimidas, Esto ocurre tanto en suelos de uso agrícola como ganadero, de relieve subnormal, donde los suelos poseen un mayor contenido de sales y/o sodio (Na)

intercambiable a diferentes profundidades (Bonadeo *et al.*, 2001, 2002 y 2006), en comparación a los sectores más elevados.

La naturaleza del suelo juega un papel fundamental en la disponibilidad de los nutrientes. Las tres causas de deficiencia de los micronutrientes son: a) baja concentración de un elemento en el suelo, b) presencia de una forma química que no puede ser utilizada por la planta, y c) efecto antagónico entre distintos elementos. Estas causas están relacionadas con las propiedades del suelo, por ejemplo el pH elevado de los suelos ocasiona la retención de estos elementos, fijándolos en formas no disponibles para las plantas (Fancelli, 2006), y a pH bajos existen más disponibilidad de nutrientes, encontrándose en algunos casos formas tóxicas no elementales de algunos minerales como puede ser el caso del aluminio. El contenido de materia orgánica, arcilla y la actividad microbiana son propiedades del suelo que controlan la disponibilidad de los metales. El contenido total de un nutriente en el suelo no siempre se relaciona con la fertilidad química pero es un indicador a utilizar para tener una aproximación de la riqueza potencial del elemento (Ratto, 2006; Roca *et al.*, 2007).

El objetivo general de este trabajo es evaluar y caracterizar de manera integral el cultivo de cebada; correlacionar causas generales y ambientales que propician reducción en los rendimientos e incremento de rechazo de la producción por incumplimiento de la calidad maltera del cultivo de cebada; y establecer indicadores de calidad para estos suelos cebaderos y el grano de cebada, cultivada en los municipios de Almoloya, Apan y Emiliano Zapata, todos ellos productores de cebada maltera de altos rendimientos en el estado de Hidalgo. Se han tenido en consideración aquellos factores que afectan la calidad del cultivo y sus rendimientos, mediante evaluaciones físico-químicas de los suelos y su manejo, análisis de composición (análisis proximales) por órgano del cultivo y la presencia o no de elementos metálicos contaminantes (Pb, Ni, Cd y Mn), provenientes de lixiviados de suelos, en muestras colectadas al momento de la cosecha y ensayos en macetas.

I.3. Bibliografía

- Bonadeo, E.; Ricardo Hampp, E.; Bongiovanni, M. D.; Selva Moreno, I.; Odorizzi, A. (2006). Relaciones entre propiedades físicas y químicas del suelo y raíces de alfalfa (*Medicago sativa* L.) Afectada por "manchoneo". *C. Suelo (Argentina)* 24 (2) 101-107.
- Bonadeo, E.; I Moreno; A Odorizzi; E Hampp; A Sorondo & M. Bongiovanni. (2002). Relación entre propiedades físico-químicas del suelo y raíces de alfalfa (*medicago sativa* L.). XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
- Bonadeo, E.; I Moreno; E. Hampp & A Sorondo. (2001). Factores del suelo que regulan la productividad del cultivo de alfalfa en áreas con Manchoneo. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo: IV-20. Cuba.

- Dexter, AR. (2004). Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Díaz-Zorita, M; GA Duarte and JH Grove. (2002). A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65: 1-18.
- Fancelli, AL. (2006). Micronutrientes en la fisiología de las plantas. Pp 11-27. En: M Vázquez (ed). *Micronutrientes en la agricultura*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, Argentina. 207pp.
- Ferreras, L; Magra, G; Besson, P.; Ovalevski, E.; García, F. (2007). Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Ci. Suel.* 25(2): 159-172.
- Hornsey, S. I. (1999). *Elaboración de cerveza*. Microbiología, Bioquímica y Tecnología. Editorial Acribia. S. A. Zaragoza, España, p. 15-29.
- Impulsora agrícola. (2002). Información de productos agrícolas en Internet. Disponible en: <http://www.infoagro.com/frutas/platano.htm>
- Lasat, M. M. (2000). The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil. American Association for the Advancement of Science, Environmental Science and Engineering Fellow. p. 33.
- Lazzari, M.; Landriscini, M.; Cantamutto, M.; Migliarina, A. M.; Rosell, R. A. (2001). Absorción de Nitrógeno por Cebada cervecera en dos suelos del sur Bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo* 19 (2):101.
- Márquez-Elías A. K. (2006). Análisis fisicoquímico de diferentes variedades de harina de cebada, revista de Salud Pública y Nutricional (RESPYN, 14(6) disponible en la página web: <http://www.respyn.uanl.mx/espaces/2006>.
- Martens, DA and WT Frankenberger. (1992). Decomposition of bacterial polymers in soil and their influence on soil structure. *Biol. Fertil. Soils.* 13: 65-73.
- Ratto, SE. (2006). Los microelementos en el sistema productivo del área pampeana. Pp 79-112. En: M Vázquez (ed). *Micronutrientes en la agricultura*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, Argentina. 207pp.
- Reynolds, WD; BT Bowman; CF Drury; CS Tana and X Lu. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110: 131-146.
- Roca, N.; Pazos M. S. and Jaume Bech. (2007). Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, zinc en suelos del noreste argentino. *C. Suelo (Argentina)* 25(1) 31-42,
- SAGARPA (2005). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Delegación Hidalgo.

- Salinas-García, JR; FM Hons and JE Matocha. (1997). Long-term effects of tillage and fertilization on soil organic matter dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 152-159.
- Savio, H. N. (1998). Cebada cervecera-Situación actual y futura. IV Congreso Nacional de Trigo y II Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño-Invernal. Actas, 6-05.
- Tscheuschner H. D. (2001). Fundamentos de tecnología de los alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza, España. pp. 14.
- USDA. (2000). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Traducción al Español del: "Soil Quality Test Kit Guide". Instituto de Suelos CRN – CNIA – INTA. Argentina, p. 1-88.

Sitios de Internet.

- <http://www.infoagro.com/herbaceos/forrajes/cebada>.
- <http://www.respyn.uanl.mx/espaces/2006>.



II. Generalidades de los suelos.

II.1. El suelo. Introducción.

Se entiende por suelo a la superficie de la tierra o la parte de la litosfera que está sometida a la acción de los agentes climáticos, biológicos y por supuesto, a la intervención masiva de las actividades humanas. En esta definición se engloba básicamente la capa superficial, sometida a una evolución permanente incidencia del factor tiempo y a unas dimensiones en constante interacción con los demás componentes de los ecosistemas en que participa incidencia del factor espacio. El término suelo se refiere además, a la región en la que se sustenta la vida vegetal y de la cual las plantas obtienen soporte mecánico y muchos de sus nutrientes (Cong, 1994).

Debido a su naturaleza permeable, penetrable y oxidable, capaz de ser deshidratado y calentado, el suelo permite el desarrollo de la vida microbiana y del sistema radical de la vegetación. Es un medio multifásico, de composición variable en el espacio y el tiempo, al que afectan fenómenos físicos, químicos, biológicos y climáticos por una parte y por otra la acción del hombre a través de la contaminación (Brissio, 2005).

El suelo es un sistema polifásico (fases inorgánica, orgánica, líquida y gaseosa) y heterogéneo donde existen productos orgánicos y minerales, los suelos constituyen ambientes de gran valor para el hombre, los animales y las plantas; éstos últimos nacen, crecen, se reproducen y mueren directa o indirectamente en ellos (Álvarez *et al.*, 2004). El suelo está compuesto por fase sólida, compuesta a su vez por la fracción mineral y la orgánica; fase líquida; y fase gaseosa, que ocupa el espacio que la fase líquida deja libre en la porosidad presente en el suelo. En promedio general la materia orgánica (MO) constituye un 5% del suelo, el agua 25%, el aire 25% mientras que la fracción mineral está representada en un 45% (figura II.1. y figura II.2.).

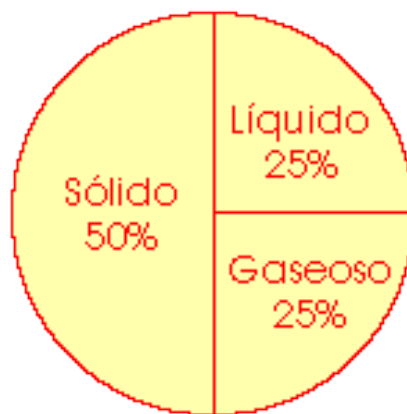


Figura II. 1. Composición porcentual de las fases del suelo (Brissio, 2005).



Como resultado de la actuación de los factores formadores sobre la roca se desarrollan procesos que conducen a la aparición de los suelos, los cuales están constituidos por las fases mencionadas. Como consecuencia de estas fases, el suelo presenta determinadas propiedades que dependen de la composición y constitución de sus componentes. La fase líquida constituye el medio ideal que facilita la reacción entre las fases, pero también se producen reacciones dentro de cada fase.

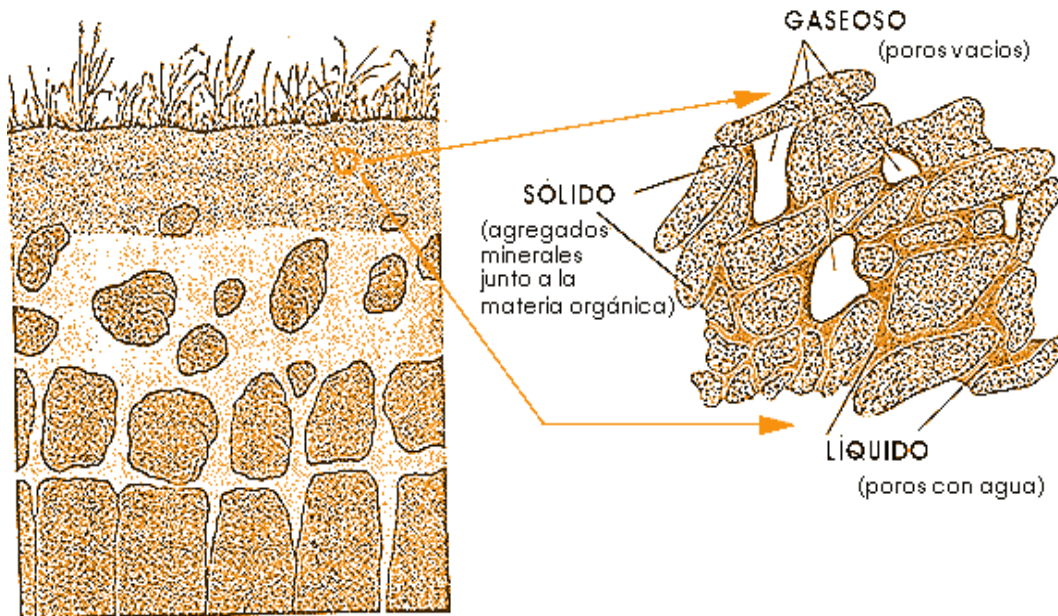


Figura. II.2. Fases del suelo (Brissio, 2005).

Los suelos manejados con siembra directa suelen presentar valores de resistencias a la penetración más elevados y, en algunos casos, aumento de la densidad aparente (Álvarez *et al.*, 2004; Díaz Zorita *et al.*, 2002). Ello es atribuible a la ausencia de remoción, sumado al efecto compactante derivado del pasaje de maquinarias (Botta *et al.*, 2004). Ambos parámetros de fertilidad física se relacionan con la aptitud de los perfiles de suelo para permitir el crecimiento de las raíces de los cultivos en forma no limitante para mejorar los rendimientos (Glinski *et Lipiec*, 1990).

El crecimiento radical se ve impedido cuando ambos parámetros exceden umbrales reconocidos, que para el caso de la resistencia a la penetración es entorno a 2-3 MPa (Glinski *et Lipiec*, 1990; Gupta *et Allmaras*, 1987). Las propiedades físicas representan un componente principal de la evaluación integral de la calidad de los suelos. Estas propiedades están, determinadas por la organización estructural de los suelos, o dicho de otro modo, su estado de agregación caracterizado por la forma, estabilidad y resiliencia (capacidad del ecosistema de absorber ciertas perturbaciones y permanecer inalterado) de la estructura (Kay, 1990). Las distintas formas que toman los agregados determinan



la distribución de tamaño y la tortuosidad de los poros. De allí que la caracterización de la entrada de agua al suelo (por ejemplo, tasa de infiltración) sea también un reconocido indicador de calidad de los mismos.

Los poros con diámetros $>100\mu\text{m}$ son esenciales para permitir la libre elongación de las raíces de los cereales (Gibbs *et Reid*, 1988). Cuando estos poros no existen o son insuficientes, las raíces deben mover las partículas de la fase sólida, la cual no debe ofrecer elevadas resistencias a la penetración (Gibbs *et Reid*, 1988; Glinski *et Lipiec*, 1990). La percepción sobre la existencia de compactación y/o consolidación del suelo por el medio productivo ha llevado a proponer la disrupción mecánica de capas compactadas con implementos de labranza profunda (por ejemplo, “para-till”, “para-plow”, labranza profunda a 25-40cm para quebrar la estructura masiva o piso de arado del suelo sin daños en los horizontes).

II.1.1. La fase sólida del suelo. Composición y perfiles del suelo.

Los minerales constituyen la base del armazón sólido que soporta al suelo. Cuantitativamente en un suelo normal la fracción mineral representa de un 45-49% del volumen del suelo. Pero dentro de la fase sólida constituyen, para un suelo representativo, del orden del 90-99% (del 10 al 1% restante corresponde a la materia orgánica). La fase sólida representa la fase más estable del suelo y por tanto es la más representativa y la más ampliamente estudiada. Es una fase muy heterogénea, formada por constituyentes inorgánico y orgánico.

Los suelos se forman a partir de una serie de interacciones entre la roca madre, cuyo papel es estático pero que sufre transformaciones provocadas básicamente por factores exógenos, el agua en sus diferentes estados, el aire, los seres vivos y la acción del hombre, si éste participa con sus actuaciones (por ejemplo a través de la contaminación). Así pues, la formación de los suelos se puede expresar en muchos casos con la ecuación de Jenny (Ochoa *et al*, 2008), a la que se le ha añadido el factor humano (h), en el caso del presente estudio (contaminación de suelos por manejos inadecuados), su incidencia es crucial. La ecuación de Jenny señala el suelo como una función compleja:

$$S = f(R, C, B, t, p, h)$$

donde: S= suelo;
R= Roca madre;
C= Clima;
B= Biología;
t= Tiempo;
p= Pendiente;
h= Acciones del hombre, en el caso de que existan.

La base de partida es la roca madre o material inicial formado por rocas, relictos edáficos o regolitos, que en cualquiera de los casos se denominan *horizonte C* si ha comenzado la edafogénesis o proceso de formación del suelo por acción de los factores citados en la ecuación de Jenny modificada.



En superficie, por el contrario, el *horizonte O* corresponde a un material orgánico en su mayoría, fresco o en descomposición, con la siguiente composición:

- 30% de Materia Orgánica si el contenido es mayor al 50% de arcilla.
- 20% de Materia Orgánica si no contiene arcilla.

A continuación los niveles u *horizontes A* contienen una alta proporción de materia orgánica (MO) aportada por los *horizontes O* que va incorporándose a la materia mineral proveniente de los horizontes superiores. Seguidamente al *horizonte A*, y si la edafogénesis continúa, se forman unos horizontes intermedios o grupos de *horizontes B* que pueden originarse por dos vías fundamentales: por acumulación de materiales de grano muy fino provenientes de los horizontes A arrastrados por el agua de infiltración, o por alteración directa de los minerales del horizonte C que tienden a emerger. Como es natural, las variaciones y posibilidades son múltiples. A continuación se presenta en la tabla II.1. en la cual se indica en forma simplificada el grado de evolución del suelo en función a su perfil (Seoáñez, 1999 y Brissio, 2005).

Tabla II.1. Evolución del perfil del suelo (Seoáñez, 1999; Brissio, 2005).

Perfil	Modo de evolución	Calificación
(A) C	Muy poco evolucionado	Suelo mineral bruto
AC	Poco evolucionado	Suelo poco diferenciado, con materia orgánica
A(B)C	Evolucionado	Suelo evolucionado por alteración
ABC	Muy evolucionado	Suelo evolucionado por alteración y emigración

El grupo más importante de los minerales del suelo es el de los silicatos (Dorronsoro, 2004). Todos los silicatos están constituidos por una unidad estructural común, un tetraedro de coordinación oxígeno-silicio (Si-O). El silicio situado en el centro del tetraedro de coordinación y rodeado de 4 oxígenos situados en los vértices. Este grupo tetraédrico se encuentra descompensado eléctricamente por los iones silicatos $(\text{SiO}_4)^{4-}$, por lo que los oxígenos se coordinan a otros cationes para compensar sus cargas. Dependiendo del número de oxígenos que se coordinen a otros silicios se originan los grandes grupos de silicatos (es decir, según el número de vértices compartidos por tetraedros, que pueden ser 0, 1, 2, 3, y 4).

En la figura II.3. se muestra a modo de ilustración un esquema donde se aprecian los perfiles del suelo.

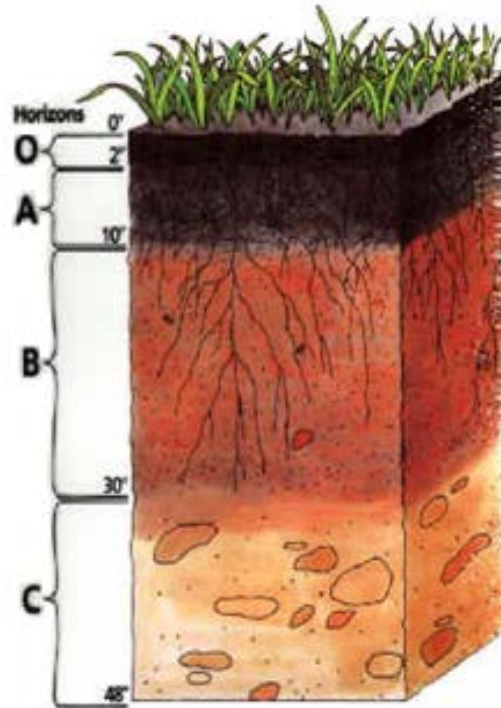


Figura II.3. Perfiles del suelo (<http://www.ttevisual.com/geography/content4.asp>).

En la tabla II.2. se aprecian los tipos de agrupamientos de los tetraedros según el número de átomos de oxígeno compartidos. Según sea la coordinación de los otros oxígenos que se unen a otros cationes distintos del silicio se forman los diferentes minerales dentro de cada gran grupo de silicatos. La estructura de estos minerales se origina por repetición de una celdilla unidad constituida por la asociación de tetraedros (aislados, o parejas, entre otros) y por los cationes que se sitúan entre los grupos tetraédricos.

Tabla II.2. Agrupamiento de tetraedros de silicio, y nombres de los grandes grupos de silicatos (Brissio, 2005).

Nº de oxígenos compartidos por cada tetraedro	Tipo de agrupamiento de los tetraedros	Nombre del gran grupo de silicato
0	Aislados	NESOSILICATOS
1	Parejas	SOROSILICATOS
2	Anillos	CICLOSILICATOS
2 y 3	Cadenas	INOSILICATOS
3	Planos	FILOSILICATOS
4	Tridimensional	TECTOSILICATOS

Desde el punto de vista edáfico el gran grupo de los filosilicatos es la clase más importante, ya que a este grupo pertenecen la mayoría de los minerales de la fracción arcilla. Los filosilicatos están constituidos por el agrupamiento de los tetraedros compartiendo entre sí tres vértices (los tres del plano basal) formando planos (figura II.4).

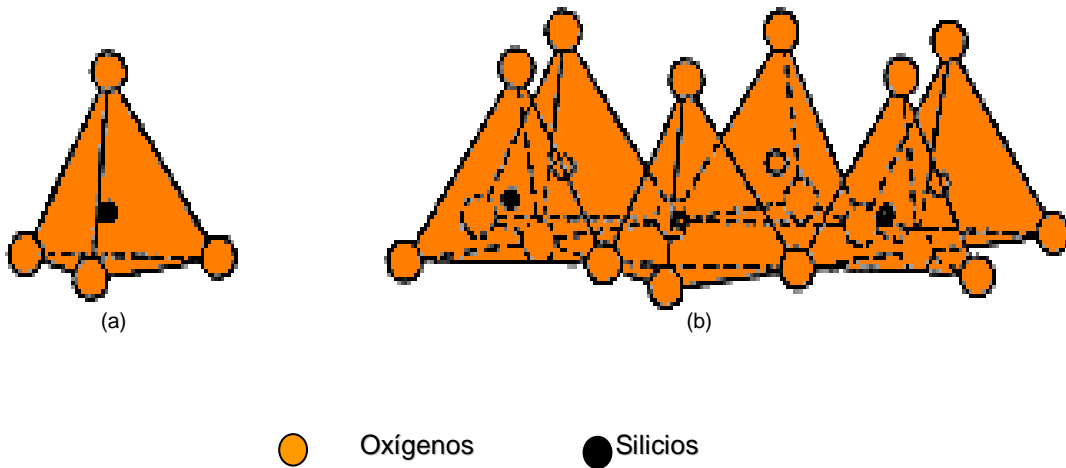


Figura. II.4. Tetraedro de silicio aislado, y en red hexagonal. Dibujo esquemático mostrando: (a) un tetraedro SiO_4^{4-} aislado y (b) capas de tetraedros dispuestos en red hexagonal (Brissio, 2005).

El cuarto vértice (vértice superior) se une a un catión de coordinación octaédrica. Generalmente el catión octaédrico es Mg (capa llamada trioctaédrica) o Al (capa dioctaédrica). De esta manera la estructura de estos minerales está formada por un apilamiento de capas de tetraedros y octaedros, formando estructuras laminares (figura II.5.). Según el modelo de repetición se forman dos tipos de láminas con diferentes estructuras. La 1:1 con una capa de tetraedros y otra de octaedros y la 2:1 con dos capas de tetraedros que engloban a una de octaedros (figura II.6.). Las capas de tetraedros y octaedros no están aisladas sino que comparten planos comunes en los que los oxígenos están unidos simultáneamente a un Si tetraédrico y a un Mg o Al octaédricos (Brissio, 2005).

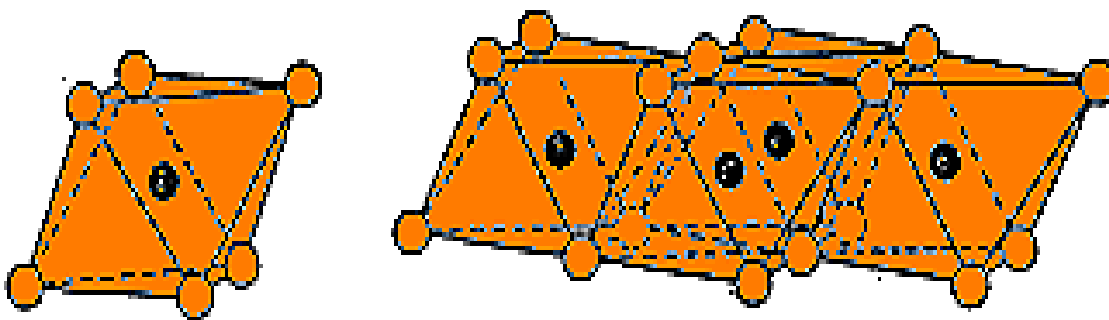


Figura. II. 5. Octaedro de aluminio aislado, y hoja de unidades octaédricas.(a) unidad octaédrica aislada y (b) hoja de unidades octaédricas (Brissio, 2005) .

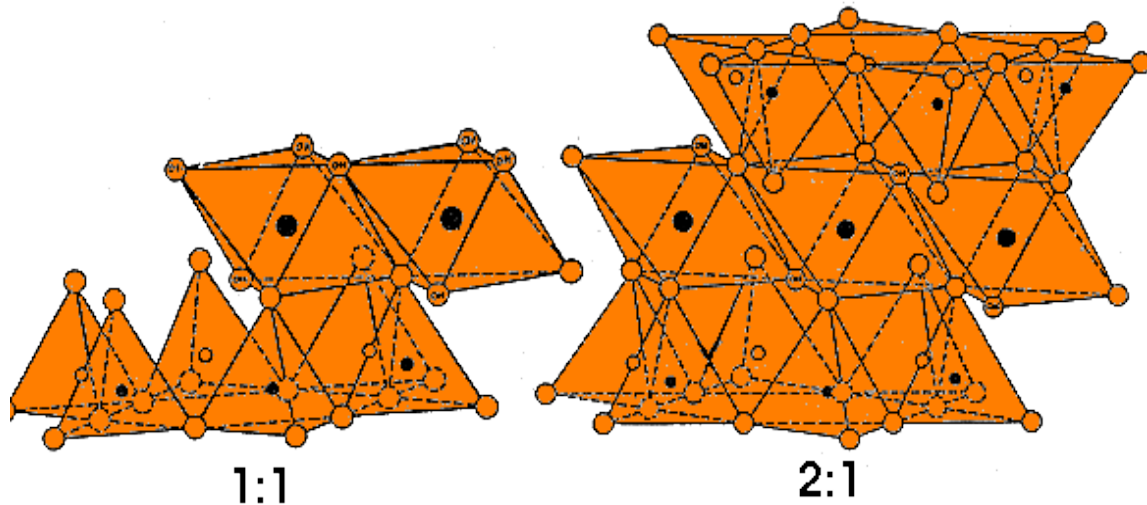


Figura. II.6. Estructura de los minerales en función del modelo de repetición de las láminas (Brissio, 2005).

En las capas tetraédricas y octaédricas se producen sustituciones entre cationes que cuando son de distinta valencia crean déficit de carga y para compensarlos son atraídos otros cationes que se introducen entre las láminas, son los llamados cationes interlaminares. Dependiendo del déficit que se origine, de donde se produzca (capa tetraédrica u octaédrica) y de los cationes interlaminares atraídos, aparecen las distintas especies minerales: caolinitas, serpentinas, micas (moscovita, biotita, illita), esmectitas (montmorillonita), vermiculita, clorita, sepiolita y vermiculita, principalmente (Zysset *et al.*, 1999; Kabata-Pendias, 2000; Acevedo *et al.*, 2002).

Por otra parte, los tectosilicatos (con los feldespatos) constituyen otro grupo muy importante, el más representativo de la fracción arena de los suelos. El cuarzo, aunque es un óxido, por su estructura es considerado por muchos autores como un constituyente de este grupo de tectosilicatos (Dorronsoro, 2004).

La materia orgánica tiene una gran importancia en la génesis y fertilidad del suelo (Dorronsoro, 2004). Incide directamente en las propiedades físicas, químicas, físico-químicas y biológicas:

- a) En las propiedades físicas:
 - Confiere al suelo un determinado color oscuro.
 - Da lugar a una buena estructura, estable. Las sustancias húmicas tienen un poder aglomerante, las cuales se unen a la fracción mineral y dan buenos flóculos en el suelo originando una estructura grumosa estable, de elevada porosidad, lo que implica que la permeabilidad del suelo sea mayor.



- Tiene una gran capacidad de retención de agua lo que facilita el establecimiento de la vegetación, dificultando la acción de los agentes erosivos.
- La temperatura del suelo es mayor debido a que los colores oscuros absorben más radiaciones que los claros.
- Protege al suelo de la erosión. Los restos vegetales y animales depositados sobre la superficie del suelo lo protegen de la erosión hídrica y eólica. Por otra parte, como ya se ha mencionado, el humus tiene un poder aglomerante y da agregados que protegen a sus partículas elementales de la erosión.
- Protege al suelo de la contaminación. La materia orgánica adsorbe plaguicidas y otros contaminantes y evita que estos percolen hacia los acuíferos.

b) En las propiedades químicas y físico-químicas:

- Las sustancias húmicas tienen propiedades coloidales, debido a su tamaño y carga (retienen agua, hinchan, contraen, fijan soluciones en superficie, dispersan y flocculan). La materia orgánica es por tanto una fase que reacciona con la solución del suelo y con las raíces.
- Capacidad de cambio. La materia orgánica fija iones de la solución del suelo, los cuales quedan débilmente retenidos, están en posición de cambio, evita por tanto que se produzcan pérdidas de nutrientes en el suelo. La capacidad de cambio es de 3 a 5 veces superior a la de las arcillas, es por tanto una buena reserva de nutrientes.
- Influye en el pH produciendo compuestos orgánicos que tienden a acidificar el suelo.
- Influye en el estado de dispersión/floculación del suelo.
- Es un agente de alteración por su carácter ácido. Descompone los minerales.

c) En las propiedades biológicas:

- Realiza un aporte de nutrientes a los microorganismos y sirve como fuente de energía.

Por los contenidos de materia orgánica, los suelos son muy variables, siendo los valores más usuales entre 0.5 - 10% (Kabata-Pendias, 2000). La materia orgánica en el suelo, se concentra en el horizonte superficial y disminuye gradualmente con la profundidad (a excepción de determinados tipos de suelos, como podsoles,



turbas y fluvisoles). En la cantidad y calidad de la materia orgánica intervienen numerosos factores.

- Del material orgánico original: cantidad, calidad, edad y tamaño de los restos.
- De las características del suelo: presencia de microorganismos, existencia de nutrientes, pH, aireación y minerales.
- De las carácter climáticas: humedad, temperatura y alternancias climáticas, fundamentalmente

II.1.2. La fase líquida del suelo

Esta fase en los suelos se caracteriza por su variabilidad en el espacio y en el tiempo, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo. Esta variabilidad está condicionada por las propiedades específicas de esa fase líquida, por las características de los espacios en que se encuentra y por las propiedades del suelo que la sustenta.

La dinámica general del agua en el suelo, está relacionada con el exterior en lo que se refiere a los aportes, como son las fuentes, la lluvia o la infiltración y en lo que se refiere a las pérdidas, como son la evaporación o la alimentación de las aguas subterráneas (acuíferos y corrientes), generalmente por infiltraciones. Ambos intercambios constituyen el balance hídrico, que tiene como reflejo por una parte el sistema suelo-vegetación-atmósfera-suelo y por otra la gestión natural, que comprende, entre otras cosas, el almacenamiento o retención en el suelo, indispensable para las plantas y para la hidrológica, y el suministro de líquido a los acuíferos (Seoánez, 1999).

El líquido del suelo es fundamentalmente una solución acuosa, y por ello, y al contener sustancias en solución, se le llama *solución del suelo*. Las soluciones del suelo proceden de la alteración de los minerales y de la materia orgánica.

El agua ejerce importantes acciones, tanto para la formación del suelo (interviene decisivamente en la meteorización física y química, y translocación de sustancias) como desde el punto de la fertilidad. La fase líquida circula a través del espacio poroso, quedando retenida en los poros del suelo; está en constante competencia con la fase gaseosa. Los cambios climáticos estacionales, y concretamente las precipitaciones atmosféricas, hacen variar los porcentajes de cada fase en cada momento. En la figura II.7 se indica un esquema representativo de la distribución de la fase líquida (agua) en los intersticios del suelo.

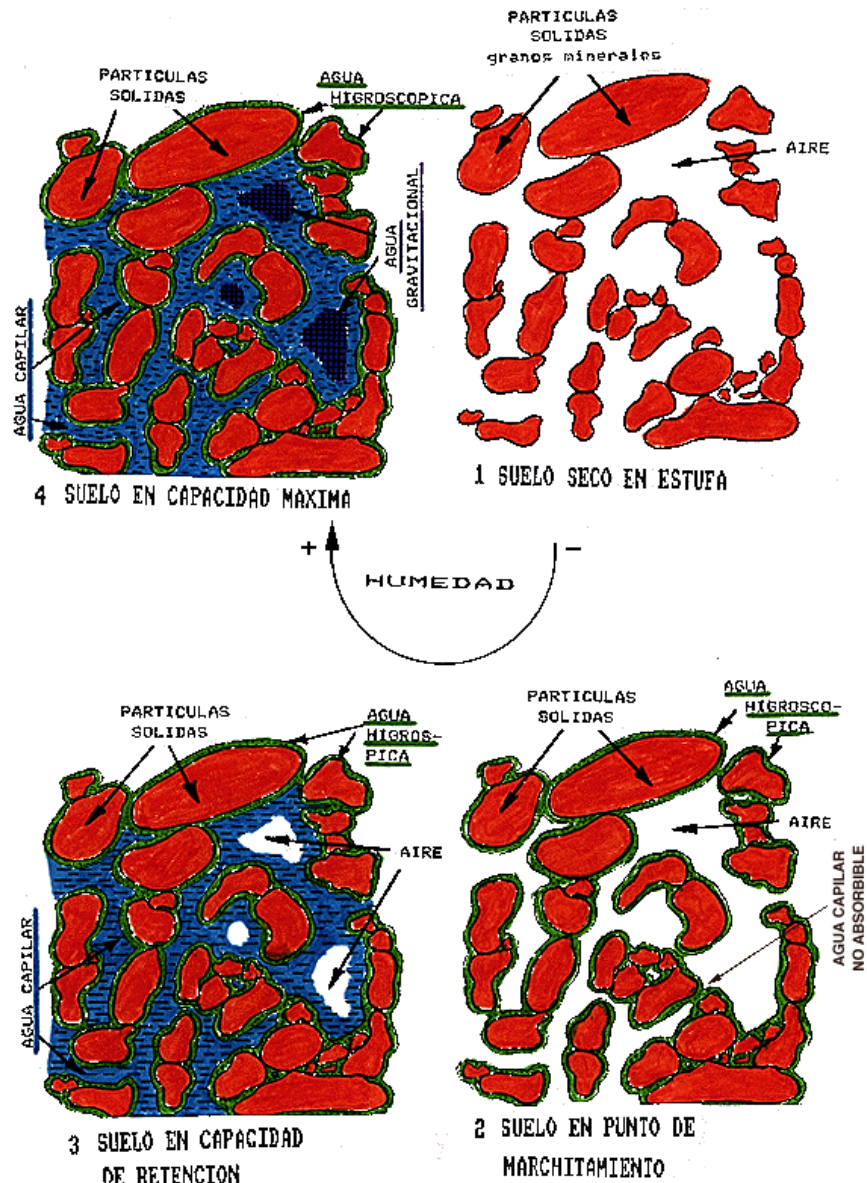


Figura. II.7. Espacio poroso por donde circula la fase líquida en el suelo (Deshpande et al., 2001).

Desde el punto de vista físico la fase líquida puede tener la siguiente clasificación (Brissio, 2005):

- Agua higroscópica: adsorbida directamente de la humedad atmosférica, forma una fina película que recubre a las partículas del suelo. No está sometida a movimiento y no es asimilable por las plantas (no es absorbible). Está fuertemente retenida a fuerzas superiores a 31 atmósferas ($> 3250 \text{ g cm}^{-2}$), que equivale a pF ($-\log$ columna de H_2O en cm) de 4.5. El pF representa la succión ejercida por un suelo y se define mediante el llamado índice de succión $\text{pF} = \log_{10} \text{hC}$, siendo hC la altura capilar (en cm). El pF puede variar entre 0 y 7, decrece para un mismo suelo, al



umentar la humedad. Las medidas de fuerzas de retención del agua del suelo llegan hasta 16000 gr.cm^{-2} (una fuerza de 1000 gr.cm^{-2} equivale a un pF de 3). También son frecuentes las medidas expresadas en atmósferas.

- Agua capilar: contenida en los tubos capilares del suelo. Dentro de ella se puede distinguir el agua capilar no adsorbible y la adsorbible:
 - a) Agua capilar no adsorbible: se introduce en los tubos capilares más pequeños ($<0.2 \mu\text{m}$). Está muy fuertemente retenida y no es adsorbible por las plantas; la fuerza de succión es de 31-15 atmósferas, que corresponde a pF de 4.5 a 4.2.
 - b) Agua capilar adsorbible: es la que se encuentra en tubos capilares de $0.2\text{-}8 \mu\text{m}$. Es un agua adsorbible por las plantas, constituye la reserva durante los períodos secos. Está fuertemente adsorbida; la fuerza de retención varía entre 15 a 1 atmósfera y se extrae a pF de 4.2 a 3.
- *Agua gravitacional*: No está retenida en el suelo. Se habla de agua gravitacional de flujo lento y agua gravitacional de flujo rápido en función de su velocidad de circulación.
 - a) De flujo lento: corresponde al agua que circula por poros comprendidos entre $8 \text{ y } 30\mu\text{m}$ de diámetro, se admite que está retenida a un pF que varía desde 3 a 1.8. Puede tardar entre 10 a 30 días en atravesar y circular por el suelo y en es entonces cuando puede ser utilizable por las plantas.
 - b) De flujo rápido: corresponde a la que circula por poros mayores de $30 \mu\text{m}$. Es un agua que no queda retenida en el suelo y es eliminada al subsuelo, puede alcanzar el nivel freático. Es un agua inútil, ya que cuando está presente en el suelo los poros se encuentran totalmente saturados de agua, el medio es asfixiante y las raíces de las plantas no la pueden tomar.

II.1.3. La fase gaseosa del suelo

Es la mezcla de gases que ocupa los espacios que la fase líquida deja libres en la porosidad de suelo. Debido a sus características intrínsecas como fluido, la fase gaseosa presenta una marcada similitud con la fase líquida del suelo, sobre todo en lo que se refiere a su dinámica, aunque tiene algunas diferencias con respecto a ésta.

La atmósfera del suelo está condicionada por la dinámica de los procesos biológicos que se producen en relación a ella y que están determinados por el



consumo de oxígeno y por la producción de CO₂ que realizan los microorganismos y las plantas durante sus procesos de oxidación.

Los distintos procesos biológicos que se producen en el suelo hacen que la fase gaseosa se encuentre sometida a constantes variaciones en su composición. A consecuencia del incremento en la proporción de determinados gases, paralelo al descenso de las proporciones de otros, se produce un desequilibrio entre la composición de la atmósfera del suelo y la del exterior, ambas en contacto directo, compensado por una serie de intercambios entre una y otra que permiten una homogeneización de la composición, y cuya función última es permitir asegurar la vida de los organismos del suelo (Seoáñez, 1999).

Un suelo en capacidad máxima de saturación de fase acuosa, no contendrá fase gaseosa mientras que otro en punto de marchitamiento presentará valores muy altos. En condiciones ideales la fase atmosférica representa un 25% del volumen total del suelo. Se admite que un porcentaje de aire del 10% es insuficiente.

La fase gaseosa del suelo se supone que tiene una composición parecida a la del aire atmosférico, pero mucho menos constante. En la tabla II.3 se presenta un balance de esta composición:

Tabla II.3. Composición del aire del suelo (Marcano et al., 1997).

Componente	Composición Aire Atmosférico %	Composición Aire del Suelo
Oxígeno	21	10-20
Nitrógeno	78	78.5-80
CO ₂	0.03	0.2-3
Vapor de Agua	variable	En saturación

Esta composición media del aire del suelo varía no sólo con la profundidad del aire sino con los cambios estacionales. En los períodos de mayor actividad biológica (primavera y otoño), hay menos O₂ y más CO₂. El aire del suelo muestra variaciones locales principalmente en los contenidos de O₂ y CO₂. En el suelo hay menos O₂ que en el aire y más CO₂. Esto se explica por todos los procesos que tienen lugar en el suelo y que implican el consumo de O₂ y el desprendimiento de CO₂, es decir aquellas reacciones en las que estén implicados todos los organismos del suelo: respiración de las plantas, actividad de microorganismos, procesos de mineralización y procesos de oxidación.

II.2. Principales propiedades físicas y fisicoquímicas del suelo

Entre las características de los suelos que influyen tanto en las propiedades físicas como físico-químicas y en la ruta o en la tasa de flujo que el agua sigue en el suelo se pueden señalar (Kabata-Pendias, 2000):

- Textura: Texturas arcillosas dificultan la infiltración del agua en el suelo y también retienen más agua por unidad de volumen.
- Estructura: Suelos con una buena estructura, favorecen la infiltración del agua.



- **Color:** Esta propiedad permite deducir rasgos importantes en el suelo: un color oscuro o negro indica contenido alto en materia orgánica, color blancuzco presencia de carbonatos y/o yesos, colores grises/verdes/azulados hidromorfía permanente. El color se caracteriza por tres parámetros que son: *Matiz o Hue*, que expresa la longitud de onda dominante en la radiación reflejada. Se consideran cinco colores principales (R, rojo; Y, amarillo; G, verde, B, azul y P, púrpura) y cinco intermedios. *Brillo o Value* que expresa la porción de luz reflejada y mide el grado de claridad o de oscuridad relativa del color comparado con el blanco absoluto. *Intensidad o Cromo* que expresa la pureza relativa del color del matiz de que se trate. Un horizonte puede presentar un color uniforme o presentar manchas de distinto color.
- **Materia orgánica:** Suelos con alto nivel de materia orgánica retienen más agua por unidad de volumen. La materia orgánica también favorecen la estructura de los suelos.
- **Pendiente del terreno:** Posiciones de altas pendientes de los suelos de cultivos, favorecen el escurrimiento del agua y evitan los encharcamientos.
- **Prácticas de manejo:** El manejo del suelo es de importancia incalculable; un buen laboreo permite que no se produzcan cambios bruscos en cuanto a erosión de los suelos.

Otra característica física de los suelos es la presencia de poros y macroporos, que se presentan como caminos o rutas preferenciales para las aguas y los productos químicos. Esto hace que los productos químicos y los contaminantes puedan ser adsorbidos fácilmente. La adsorción se define como la tendencia del producto a unirse al suelo. El coeficiente de adsorción “K” expresa la relación entre la concentración de un producto en el suelo con relación a la concentración de este mismo producto en la solución (ppm en el suelo/ppm en la solución); entonces a mayor adsorción mayores valores de K.

Los suelos varían por su magnetismo, verificándose que cuanto mayor es el contenido de materia orgánica del suelo, mayor va a ser su capacidad para adsorber productos, es decir, mayor magnetismo (Perdomo, 2005). Debido a la relación entre el porcentaje de materia orgánica (%MO) del suelo y K, muchas veces se expresa la tendencia de un producto a ser adsorbido de manera independiente, expresándose por el K_{α} que permite corregir el valor de K en función del carbono orgánico. La real adsorción de un producto o elemento particular en un suelo específico se estima a partir de la siguiente fórmula:

$$K = [K_{\alpha} (\%MO / 1.7)] / 100$$

Los valores de K son útiles para predecir los caminos de salida o vías de contaminación del producto. Sustancias con valores de K superiores a 100 se pierden generalmente asociados a pérdidas de sedimentos. Sustancias con valores de K entre 1 -100, se pierden con el agua de escurrimiento superficial y las sustancias con valores de K entre 0 – 1 suelen perderse con los lavados (Perdomo, 2005).



Otra característica de los suelos que incide en el movimiento del agua, es la salinidad de los mismos. La variabilidad existente en cuanto a la tolerancia a diferentes niveles de salinidad por los cultivos de cebada permiten evaluar los diferentes suelos y sistemas de riego y transportación de sales en los mismos (Isla, 2004).

II.2.1. Textura, densidad, granulometría y estructura de suelos

El suelo está constituido por partículas de muy diferente tamaño. Conocer esta granulometría es esencial para cualquier estudio del suelo. Para clasificar a los constituyentes del suelo según su tamaño de partícula se han establecido muchas clasificaciones granulométricas. Básicamente todas aceptan los términos de grava, arena, limo y arcilla, pero difieren en los valores de los límites establecidos para definir cada clase. De todas estas escalas granulométricas, son la de Atterberg o Internacional (llamada así por haber sido aceptada por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo) y la americana del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) las más ampliamente utilizadas. Ambas clasificaciones se reproducen en la figura II.8.

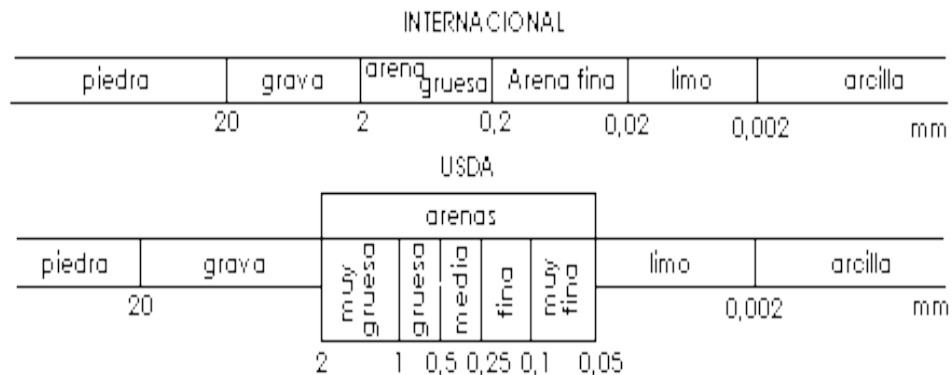


Figura. II.8. Escalas granulométricas, Internacional, y del USDA (Brissio, 2005).

El término textura se usa para representar la composición granulométrica del suelo. Cada término textural corresponde con una determinada composición cuantitativa de arena, limo y arcilla. En los términos de textura se prescinde de los contenidos en gravas; se refieren a la fracción del suelo que se estudia en el laboratorio de análisis de suelos y que se conoce como *tierra fina*. Los términos texturales se definen igualmente de una manera gráfica en un diagrama triangular que representa los valores de las tres fracciones. En la figura II.9 se muestra el conocido triángulo de textura.

Las partículas no están sueltas sino que forman agregados, siendo por lo tanto necesario destruir la agregación para separar las partículas individuales. Por ello antes de proceder a la extracción de las diferentes fracciones hay una fase previa de preparación de la muestra.



En esta fase previa existen diversos métodos para separar a las partículas del suelo, unos son métodos físicos (tritución suave, agitación lenta, agitación rápida, ultrasonidos, lavado y cocción) y otros son técnicas químicas (oxidación de la materia orgánica con agua oxigenada, ataque ácido de los carbonatos y compuestos de Fe con HCl, dispersión de las arcillas con hexametáfosfato sódico o amoníaco). Como los agentes agregantes pueden ser muy distintos, normalmente no sirve uno sólo de estos métodos sino que se realiza una cadena de tratamientos.

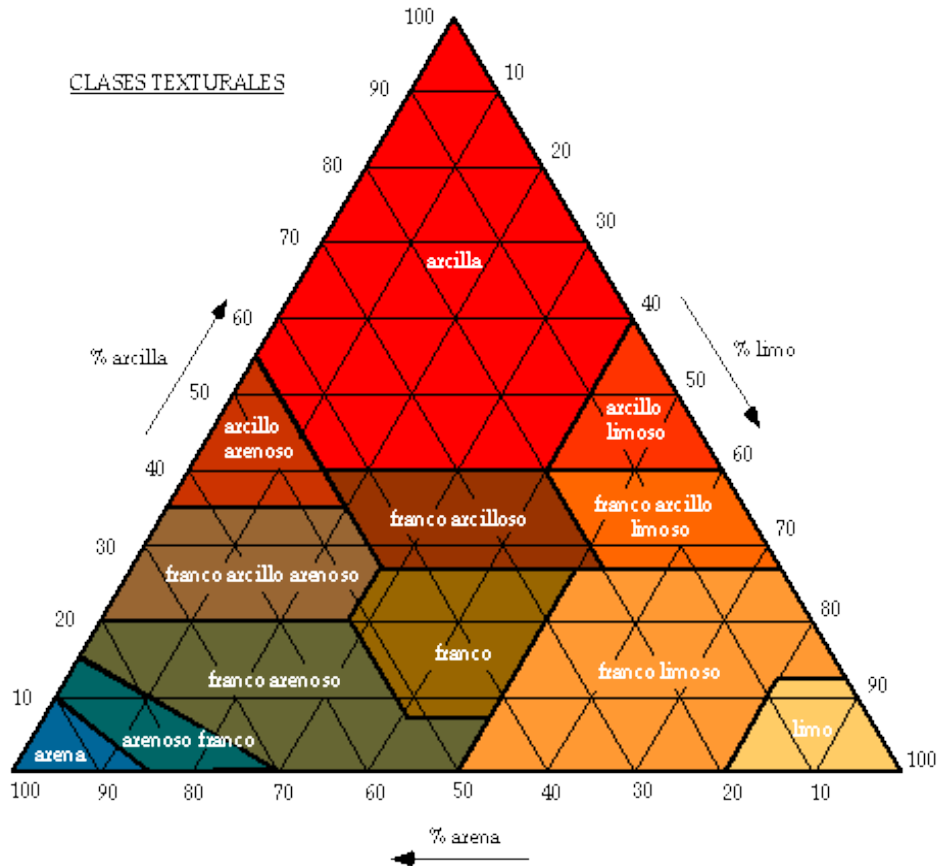


Figura. II.9. Triángulo de Texturas (Brissio, 2005).

La extracción final de las fracciones se realiza por tamizado para las arenas, mientras que la sedimentación en fase acuosa es el método normal de separación de los limos y de las arcillas. Si se necesita sub-fraccionar a la fracción arcilla se ha de recurrir a la centrifugación.

Las partículas de arena de los suelos, tienen un diámetro que puede oscilar entre 0.05 a 2 mm. Las estructuras y partículas cuyos diámetros se encuentran entre 0.002 y 0.05 mm se clasifican como limo, mientras que las de diámetro menor de 0.002 mm se consideran como partículas de arcilla (Ramírez et Grundvig, 2000).



Existe un método para calcular la textura de una manera aproximada en base a la plasticidad que presenta la fracción arcilla al añadirle agua. Se toma una pequeña cantidad de muestra en la palma de la mano, se le añade agua hasta saturación. Se frota las manos para hacer un cilindro pequeño y en función de la facilidad de formar un tubo delgado y según que se pueda o no doblar se establecen las texturas arcillosas, franco arcillosas y francas. En función de la aspereza (se frota la muestra junto al oído y se escucha el chirrido de los granos) se determina la importancia de los contenidos en arena (Ramírez et Grundvig, 2000).

El análisis granulométrico representa el dato más valioso para interpretar la génesis y las propiedades de los suelos. Un análisis granulométrico permite valorar ciertas características de los suelos, tales como:

- a) *Textura y factores formadores*: la acción de los factores formadores queda reflejada en la textura del suelo. Así, la roca tiende a dar una determinada clase textural, que quedará más patente cuanto más joven sea el suelo (en un principio el suelo hereda la textura del material original). El clima tiende a condicionar la textura en función de su agresividad (texturas gruesas en climas áridos y texturas arcillosas en climas húmedos y templados). El relieve condiciona el transporte de las partículas, como así también el tiempo tiende a dar una mayor alteración y favorece el aumento de la fracción arcilla.
- b) *Textura y procesos de formación*: la actuación de determinados procesos queda reflejada en la textura: fersialitización (texturas arcillosas), ferralitización y podsolización (concentración de arenas), iluviación de arcilla (produce contrastes texturales entre los horizontes de un suelo).
- c) *Textura y grado de evolución*: la relación entre la cantidad de arcilla del material original y la de cada uno de los horizontes de un suelo es un buen índice del grado de evolución.
- d) *Textura y clasificación de suelos*: en todas las clasificaciones de suelos la textura es un carácter diferencia ampliamente utilizado para definir las clases de suelos a todos los niveles.
- e) *Textura y evaluación de suelos*: de igual manera que en las clasificaciones de suelos, también a nivel de evaluación la textura del suelo es un parámetro evaluador de la calidad.
- f) *Textura y propiedades del suelo*: la gran mayoría de las propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas están influenciadas por la granulometría : estructura, color consistencia, porosidad aireación, permeabilidad, hidromorfía, retención de agua, lavado, capacidad de cambio, reserva de nutrientes.
- g) *Textura y propiedades agrológicas*: los suelos arenosos son inertes desde el punto de vista químico, carecen de propiedades coloidales y de reservas



de nutrientes. En cuanto a las propiedades físicas presentan mala estructuración, buena aireación, muy alta permeabilidad y nula retención de agua. Por el contrario los suelos arcillosos son muy activos desde el punto de vista químico, adsorben iones y moléculas, floculan (la fracción arcilla permanece inmóvil) y dispersan (migran), son muy ricos en nutrientes, retienen agua, bien estructurados, pero son impermeables y asfixiantes. Los suelos limosos tienen nula estructuración, sin propiedades coloidales, son impermeables y con mala aireación. Los suelos francos son los equilibrados con propiedades compensadas (Ramírez et Grundvig, 2000).

- h) *Textura y erosión:* las partículas de arena son arrastradas por el viento y agua, las arenas finas son muy erosionables. Las arcillas se pegan y se protegen, los limos no se unen y se erosionan más fácilmente.
- i) *Textura y contaminación:* las arenas son muy inertes mientras que las arcillas tienen un alto poder de amortiguación, pueden fijar y transformar a los contaminantes y presenta por tanto una alta capacidad de autodepuración.

Las partículas del suelo no se encuentran aisladas, forman agregados estructurales llamados *peds*, estos agregados (o terrones) por repetición, dan como resultado, el suelo. Es la celda unidad de los cristales la que por repetición origina el mineral. Los agregados están formados por partículas individuales (minerales, materia orgánica y huecos) y le confieren al suelo una determinada estructura (Ramírez et Grundvig, 2000).

Se habla de estructura como una propiedad y es más bien un estado, ya que cuando el suelo está seco, se agrieta y se manifiesta la estructura, pero si está húmedo, el suelo se vuelve masivo, sin grietas y la estructura no se manifiesta a la vista. En los *peds* (entendiéndose como los agregados de mayor tamaño en la jerarquía de estructuras edáficas que se caracterizan por su forma de bloques, gránular, columnar), hay material inerte, arenas, que se unen por la materia orgánica, las arcillas y otros agentes cementantes. Si las arcillas están dispersas, el suelo carece de estructura (granular débil), si están floculadas, forman estructura rígida (prismática fuerte). En la figura II.10 se aprecian los estados de agregación de los perfiles superficiales de un suelo.

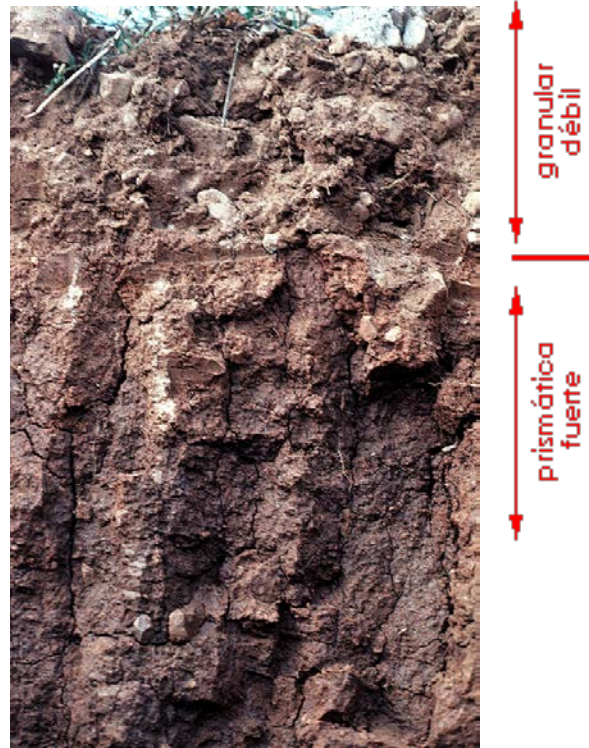


Figura II.10. Estado de agregación de los perfiles superficiales de un suelo.
(<http://edafologia.ugr.es>. Abril, 2010)

Dentro de la estructura destacan la macro y micromorfología y la estabilidad de la misma:

a) *Macromorfología.*

Desde el aspecto morfológico la estructura del suelo se define por la forma (tendencia a manifestarse con un determinado hábito), el tamaño (gruesa, media, fina y muy fina) y el grado de manifestación de los agregados o sea según la intensidad con que se manifieste el desarrollo de la estructura: fuerte, media, débil, nula. Los agentes responsables de la estructura son las características hídricas junto a la textura y materia orgánica. También influyen: pH, CO_3^- , óxidos e hidróxidos de Fe, actividad biológica.

b) *Micromorfología.*

La estructura se presenta en el campo y en el perfil del suelo, pero su estudio se completa con un microscopio petrográfico. Se analiza no sólo la forma de los agregados sino que además se estudia la composición (fragmentos gruesos, minerales y orgánicos, material fino y poros) y organización (distribuciones, orientaciones y organizaciones de los elementos que componen la estructura). A partir de la observación micromorfológica se pueden deducir los procesos que han tenido lugar durante la formación del suelo. La micromorfología estudia los



constituyentes del suelo y su organización (distribuciones, orientaciones y organizaciones).

c) *Estabilidad de la estructura.*

Representa la resistencia a toda modificación de los agregados. El agente destructor de la estructura es el agua, que hincha los materiales y dispersa los agregados. Los agregados que están en la superficie del suelo, son dispersados por el impacto de las gotas de lluvia. Por otra parte, al mojarse los pedos, el agua va entrando hacia al interior de los agregados, va comprimiendo el aire que había y llega un momento en el que el aire tiene que salir y colapsa o rompe el agregado. (Carter *et al.*, 1986).

En el suelo, como cualquier otro cuerpo físico, la densidad se define como la masa por unidad de volumen. Ahora bien, dado su carácter poroso, conviene distinguir entre la densidad de sus componentes sólidos y la del conjunto del suelo, incluyendo los huecos, por ello nos referiremos a dos tipos de densidad: real y aparente (Acevedo *et al.*, 2002).

La densidad real es un valor muy permanente la mayor parte de los minerales arcillosos presentan una densidad que está alrededor de 2.65 g cm^{-3} . Muy semejante es la de los minerales más abundantes en las arenas, como cuarzo, feldspatos, entre otros. Los carbonatos presentan una densidad algo menor así como la materia orgánica.

La densidad aparente refleja la masa de una unidad de volumen de suelo seco y no perturbado, para que incluya tanto a la fase sólida como a la gaseosa englobada en ella. Para establecerla debemos tomar un volumen suficiente para que la heterogeneidad del suelo quede suficientemente representada y su efecto atenuado. Es muy variable según el suelo, incluso en cada uno de los horizontes porque depende del volumen de los poros. Si el suelo es compacto, la densidad sube. Su valor en los horizontes A suele estar comprendido entre 1 y 1.25 g cm^{-3} , mientras que en los horizonte B puede alcanzar hasta 1.5 g cm^{-3} o más alto. Su valor permite establecer equivalencias entre las relaciones masa/masa, que son la forma habitual de medir los parámetros del suelo, y las masa/superficie que son las utilizadas en la aplicación de aditivos al mismo para corregir sus deficiencias.

Si se quiere adicionar un determinado porcentaje de un elemento establecido, hemos de conocer la masa de suelo que corresponde a una superficie definida para un espesor concreto. Usualmente se utiliza como unidad de superficie la hectárea y como profundidad la correspondiente a la capa arable que se establece como promedio en 30 cm. De este modo, la masa de una hectárea podemos calcularla multiplicando la densidad aparente por su volumen, que vendría expresado por el producto del espesor deseado en metros multiplicado por 10.000 que es su superficie en metros cuadrados. En este caso la densidad debería expresarse en Mg/m^3 y el resultado final quedaría en Mg/ha . Una vez conocido ese valor ya es posible aplicar cualquier relación masa/masa obtenida en la



determinación del parámetro a corregir, sin más que adecuar convenientemente las unidades (Lado *et al.*, 2004).

El continuo laboreo mecánico atenta contra la estructura del suelo, haciendo que la pérdida de MO sea abundante y que sus agregados se rompan, perdiendo así su necesaria porosidad. El cuidado del suelo implica la preservación y/o reconstrucción de la estructura al aumentar la cantidad de macros y micros poros. Para esto, la adopción de la siembra directa es importante, pero no es la única opción válida, a ésta, se le deben agregar otras prácticas tales como: la rotación de cultivos, la fertilización consciente y eficiente, el control equilibrado de plagas vegetales y animales, el uso racional de los fitosanitarios, entre otras, esto demuestra que en el funcionamiento del sistema, impactan tanto los factores culturales como los paquetes tecnológicos de producción que son importantes en sí mismos y sobre todo en sus interacciones (Ferlini, 2005).

II.2.2. Medida de la salinidad en suelos. Conductividad eléctrica (CE)

La CE ha sido el parámetro más extendido y el más ampliamente utilizado en la estimación de la salinidad. Se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución (Dorronsoro, 2004).

Hasta hace unos años se expresaba en mmhos/cm, hoy día las medidas se expresan en dS/m, siendo ambas medidas equivalentes ($1 \text{ mmhos/cm} = 1 \text{ dS/m}$). Por tanto la CE refleja la concentración de sales solubles en la disolución.

Para distinguir suelos salinos de no salinos, se han sugerido varios límites arbitrarios de salinidad. Se acepta que las plantas empiezan a ser afectadas de manera adversa cuando el contenido en sales excede del 1%. La clasificación americana de suelos, Soil Taxonomy, adopta el valor de 2 dS/m como límite para el carácter salino a nivel de gran grupo y subgrupo de suelos, pues considera que a partir de ese valor las propiedades morfológicas y fisicoquímicas del perfil (y por tanto la génesis) quedan fuertemente influenciadas por el carácter salino. Por otro lado el laboratorio de salinidad de los EE.UU. ha establecido el límite de 4 dS/m para que la salinidad comience a ser tóxica para las plantas (Perdomo, 2005).

En base a las CE, el laboratorio de salinidad de los Estados Unidos, Riverside, establece los siguientes grados de salinidad (Pachepsky *et Rawls*, 1999; Pachepsky *et al.*, 2001):

- Valores de 0 a 2: *suelos normales;*
- De 2 a 4: *quedan afectados los rendimientos de los cultivos muy sensibles. Suelos ligeramente salinos;*
- De 4 a 8: *quedan afectados los rendimientos de la mayoría de los cultivos. Suelos salinos;*



- De 8 a 16: sólo se obtienen rendimientos aceptables en los cultivos tolerantes. Suelos fuertemente salinos;
- Mayor de 16: muy pocos cultivos dan rendimientos aceptables. Suelos extremadamente salinos.

En lo referente al agua en la siguiente tabla (Tabla II.4.) se resumen sus valores normales en diferentes ambientes:

Tabla II.4. Valores normales de CE, para diferentes tipos de agua. (Pachepsky et Rawls, 1999; Pachepsky et al., 2001)

Tipo de Agua	CE a 25° en dS/m
Agua de lluvia	0.15
Agua de río	0.30
Agua de riego	0.75 – 2.25

La CE de un suelo cambia con el contenido en humedad, disminuye en capacidad máxima (se diluye la solución) y aumenta en el punto de marchitamiento (se concentran las sales) (Dorronsoro, 2004). Se ha adoptado que la medida de la CE se hace sobre el extracto de saturación a 25°C. En cuanto al método, a una muestra de suelo se le añade agua destilada a 25°C hasta conseguir la saturación y se extrae el agua de la pasta mediante succión a través de un filtro.

II.2.3. pH, potencial redox y potencial zeta de los suelos

La acidez del suelo mide la concentración de iones hidronios. En los suelos los hidronios están en la solución, pero también existen en el complejo de intercambio, o sea hay dos tipos de acidez, activa o real (en solución) y de intercambio o de reserva (para los adsorbidos). Ambas están en equilibrio dinámico. Si se eliminan H⁺ de la solución se liberan otros tantos H⁺ adsorbidos. Como consecuencia el suelo muestra una fuerte resistencia a cualquier modificación de su pH, está fuertemente tamponado (fuente: <http://edafologia.ugr.es>, 2010)

Los factores que hacen que el suelo tenga un determinado valor de pH son diversos, fundamentalmente:

- De acuerdo a la naturaleza del material original, ya que según sea el origen de la roca la reacción será ácida o básica.
- Factor biótico: los residuos de la actividad orgánica son de naturaleza ácida.
- Las precipitaciones tienden a acidificar al suelo y desaturarlo al intercambiar los H⁺ del agua de lluvia por los iones Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ de los cambiadores, tal como puede apreciarse en la figura II.11.



- Complejo adsorbente: según si el suelo está saturado con cationes de reacción básica (Ca^{2+} , Mg^{2+}) o de reacción ácida (H^+ o Al^{3+}). También dependiendo de la naturaleza del cambiador variará la facilidad de liberar los iones adsorbidos.

El pH influye en las propiedades físicas y químicas del suelo. Los pH neutros son los mejores para las propiedades físicas de los suelos. A pH muy ácidos hay una intensa alteración de minerales y la estructura se vuelve inestable. En pH alcalino, la arcilla se dispersa, se destruye la estructura y existen malas condiciones desde el punto de vista físico.

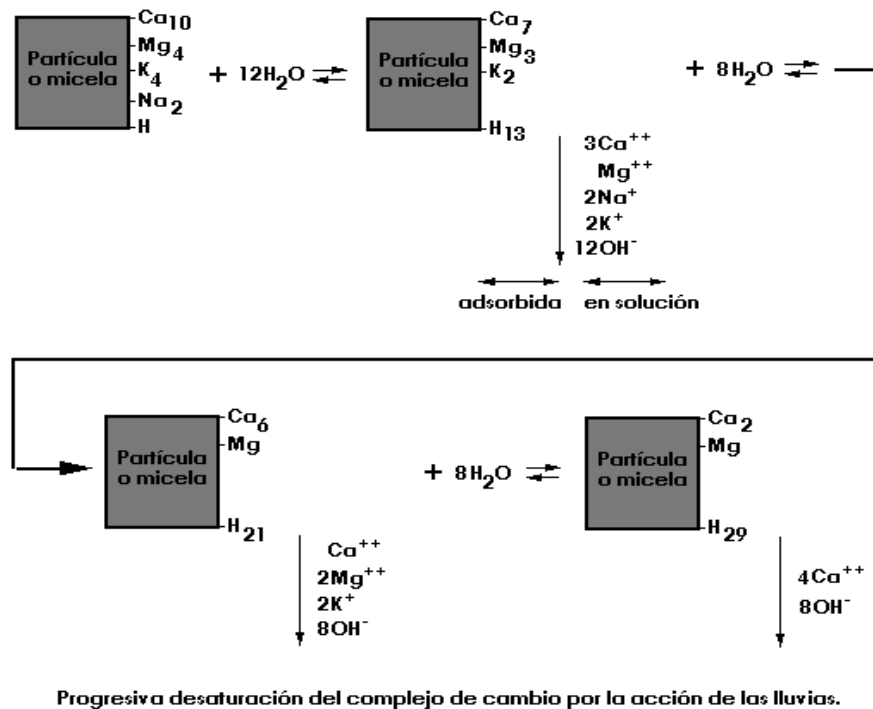


Figura II.11. Intercambio de H^+ producido por las precipitaciones (Dorrnsoro, 2004).

Por otro lado, la asimilación de nutrientes del suelo está influenciada por el pH, ya que determinados nutrientes se pueden bloquear en determinadas condiciones de pH y no son asimilables para las plantas (figura II.12). Alrededor de pH 6-7.5 se dan las mejores condiciones para el desarrollo de las plantas (Dorrnsoro, 2004).

Las condiciones de oxidación-reducción (potencial redox, Eh) del suelo son de gran importancia para procesos de meteorización, formación de diversos suelos y procesos biológicos, también están relacionadas con la disponibilidad de ciertos elementos nutritivos. La formulación química de las reacciones de oxidación-reducción es la siguiente:





En el suelo existe un equilibrio entre los agentes oxidantes y reductores. La materia orgánica se encuentra reducida y tiende a oxidarse, es reductora, ya que al oxidarse tiene que reducir a otro de los materiales del suelo. Por el contrario el oxígeno es oxidante. Por otra parte, hay muchos elementos químicos que funcionan con estados de oxidación variables, puede oxidarse o reducirse según el ambiente que predomine.

pH	Designación de los suelos	Cultivos o rotaciones agrícolas
de 3 a 4.5	Suelos extremadamente ácidos.	Pantano, landas o bosques de especies acidófilas.
de 4.5 a 5	Suelos muy fuertemente ácidos.	Landas o prados.
de 5 a 5.5	Suelos muy ácidos.	Prados, cultivos de especies acidófilas (Centeno).
de 5.5 a 6	Suelos ácidos.	Prados y algunos cultivos (Maíz).
de 6 a 6.75	Suelos poco ácidos.	Todos los cultivos excepto leguminosas calcícolas.
de 6.75 a 7.25	Suelos neutros.	Todos los cultivos.
de 7.25 a 8.5	Suelos alcalinos.	Todos los cultivos excepto las especies calcífugas.
mayor a 8.5	Suelos muy alcalinos.	Dificultades o fracasos de los cultivos europeos corrientes.

Figura II.12. Clasificación de los suelos para los cultivos en función del pH (Dorronsoro, 2004).

Los procesos de oxidación y reducción envuelven a elementos que pueden actuar con diferentes estados de oxidación, entre ellos tenemos: Fe, Mn, S, N, entre otros. Algunos ejemplos de procesos de oxidación en el suelo son: del Fe^{+2} de minerales primarios en Fe^{+3} formando óxidos e hidróxidos; la transformación de Mn^{+2} en Mn^{+4} ; la oxidación de S^{-} , por ejemplo de pirita a sulfatos SO_4^{2-} ; la nitrificación o transformación de NH_4^{+} en nitritos NO_2^{-} y nitratos NO_3^{-} .

Por el contrario, muchos procesos suceden bajo condiciones reductoras como la desnitrificación, la desulfurización, la formación de compuestos con Fe^{+2} y Mn^{+2} . En los suelos normales el ambiente es aireado y por tanto la tendencia general es oxidante. En los suelos hidromorfos la saturación en agua tiende a provocar un ambiente reductor. Los valores de pH y potencial redox (Eh) delimitan los campos de estabilidad de los materiales del suelo. Los compuestos de Fe y Mn son muy sensibles a cambios de pH y Eh.

Sobre valores y comportamiento del potencial zeta (pZ) en los extractos de saturación de suelos, no se han encontrado reportes en la bibliografía especializada. Un punto de particular interés es el potencial donde se unen la capa difusa y la capa de Stern de un sistema coloidal. Este potencial es conocido como el potencial zeta (pZ), el cual es importante porque puede ser medido de una manera muy simple, mientras que la carga de la superficie y su potencial no pueden medirse. El potencial zeta puede ser una manera efectiva de controlar el comportamiento del coloide, puesto que indica cambios en el potencial de la



superficie y en las fuerzas de repulsión entre los coloides. Esto es aplicable a los extractos de saturación de suelos, de esta manera es factible estimar que tan estable es el extracto conteniendo las fracciones solubles de las sales del suelo (Malvern, 2004). Varios métodos pueden ser usados para este propósito, tales como cambios en la atmósfera iónica, el pH o agregando compuestos activos para afectar directamente la carga del coloide. En cada caso la medida del potencial zeta (pZ) indicará el efecto de la alteración, principalmente en su estabilidad.

II.2.4. Materia orgánica, nutrientes esenciales y no esenciales.

En promedio general la materia orgánica constituye un 5% del suelo. La determinación de materia orgánica del suelo cebadero se evalúa a través del contenido de carbono orgánico con el método de Walkley y Black. Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84% del carbón orgánico total. Un buen nivel de materia orgánica en suelos cebaderos se considera entre 4.0–4.5 %. (Álvarez *et al.*, 2004).

La materia orgánica del suelo está compuesta por todos los materiales orgánicos muertos, de origen animal o vegetal, junto con los productos orgánicos producidos en su transformación.

Una pequeña fracción de la materia orgánica incluye materiales ligeramente transformados y productos que han sido completamente transformados, de color oscuro y de alto peso molecular, llamados compuestos húmicos.

Después que se han añadido residuos orgánicos frescos al suelo hay un rápido aumento en la población de organismos debido a la abundancia de material fácilmente descompuesto, incluyendo azúcares y proteínas. Estos elementos son transformados en energía, CO_2 y H_2O y en compuestos sintetizados por los organismos. A medida que la cantidad de materia orgánica de fácil descomposición disminuye, el número de organismos también disminuye. Los sucesores de estos organismos atacan los restos, formados por compuestos más resistentes de celulosa y lignina y también compuestos sintéticos, reduciendo su proporción gradualmente a medida que aumenta el humus. La velocidad de transformación de los residuos orgánicos frescos depende de la naturaleza de la materia orgánica inicial y de las condiciones ambientales del suelo.

Después de la aplicación, por ejemplo, de materiales leñosos u otros residuos orgánicos que tienen un alto contenido de carbono y un bajo contenido de nitrógeno –o sea una relación C/N alta- los organismos consumen el nitrógeno disponible en el suelo, inmovilizándolo. Como resultado, durante algún tiempo habrá poco nitrógeno disponible para las plantas. Con la descomposición gradual de la materia orgánica, la población de organismos se reduce y el nitrógeno vuelve a estar disponible para las plantas, estableciendo una relación C/N entre 10 y 12.

Para evitar la competencia por el nitrógeno entre los organismos y las plantas, es conveniente esperar que los residuos orgánicos alcancen un estado avanzado de descomposición antes de la siembra de un nuevo cultivo.



La materia orgánica agregada al suelo normalmente incluye hojas, raíces, residuos de los cultivos y compuestos orgánicos correctivos. Como muchos de los residuos vegetales se aplican en la superficie o en la capa superior del suelo, el contenido de materia orgánica de esta capa tiende a ser más alto y a decrecer con la profundidad.

El contenido de nutrientes de la materia orgánica es importante para las plantas. Por medio de la actividad de la flora y la fauna presentes en el suelo estos nutrientes son transformados en sustancias inorgánicas y pasan a estar disponibles para las plantas. La materia orgánica también puede ser agregada usando abonos verdes o residuos orgánicos como estiércol o composta.

La materia orgánica favorece la formación de una estructura estable de agregados en el suelo por medio de la estrecha asociación de las arcillas con la materia orgánica. Esta asociación incrementa la capacidad de retención de agua ya que puede absorber de tres a cinco veces más de su propio peso, lo cual es especialmente importante en el caso de los suelos arenosos. La materia orgánica incrementa la retención de los nutrientes del suelo disponibles para las plantas debido a su capacidad de intercambio de cationes la CIC del humus varía entre 1 y 5 meq/g (Urbano, 1992; FAO, 2000).

La disponibilidad de nutrientes es fundamental para el desarrollo de los cultivos. El contenido de nutrientes del suelo depende del material y el proceso de formación del suelo –el contenido original del suelo-, del abastecimiento y naturaleza de los fertilizantes, de la intensidad de la lixiviación y la erosión, de la absorción de los nutrientes por parte de los cultivos y de la CIC del suelo.

Aunque la deficiencia de nutrientes en muchos casos puede ser fácilmente corregida, los suelos con mejor disponibilidad natural de nutrientes requerirán menores inversiones y, por lo tanto, muestran una aptitud natural para dar mejores rendimientos. El conocimiento de la necesidad de aplicar o no grandes cantidades de nutrientes en forma de fertilizantes, comparado con la disponibilidad de recursos, es un factor determinante para la recomendación de uso de la tierra.

Además de evaluar los contenidos y proporciones de cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) también será necesario evaluar el contenido de nitrógeno del suelo –a través de la materia orgánica-, el contenido de fósforo disponible, el contenido de micronutrientes esenciales y el valor de la CIC del suelo.

II.2.5. Capacidad de intercambio iónico (CIC).

Dentro del cambio iónico el más importante y mejor conocido es la capacidad de intercambio catiónico (CIC). En el suelo son varios los materiales que pueden cambiar cationes, los principales son las arcillas y la materia orgánica (los dos materiales presentan propiedades coloidales). Una suspensión o dispersión coloidal es un sistema físico que está compuesto de un material en forma líquida o gaseosa, en el cual hay inmersas partículas, por lo general sólidas, de pequeño tamaño, en principio, del orden de las micras (Malvern, 2004).



Las causas de la capacidad de cambio de cationes de las arcillas son:

- ♦ Sustituciones atómicas dentro de la red.
- ♦ Existencia de bordes (superficies descompensadas).
- ♦ Disociación de los OH^- de las capas basales.
- ♦ Enlaces de Van der Waals, que es un tipo de forma electrostática y se establece entre dos grupos no cargados. Son muy débiles individualmente, pero son importantes cuando su número es elevado.

En las arcillas, además de en su superficie, los iones pueden penetrar entre las láminas.

Las causas de la capacidad de cambio de la materia orgánica son:

- ♦ Disociación de los OH^- .
- ♦ Disociación de los grupos funcionales $-\text{COOH}$ (ver figura II.13).

En cuanto a los factores que hacen que un suelo tenga una determinada capacidad de cambio de cationes son varios, entre ellos:

- Tamaño de las partículas. Cuanta más pequeña sea la partícula, más grande será la capacidad de cambio.
- Naturaleza de las partículas. La composición y estructura de las partículas influirá en las posibilidades de cambio de sus cationes. Así la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de algunos de los materiales más comunes en los suelos los representamos en la siguiente tabla (tabla II.5). La naturaleza del cambiador confiere mayor a menor capacidad de cambio. Cada 1% de arcilla puede repercutir en medio miliequivalente en la capacidad de cambio de cationes del suelo. Si en vez de arcilla nos referimos a la materia orgánica, cada 1% puede repercutir en 2 miliequivalentes más (Gibbs *et Reid*, 1988).
- Tipo de cationes cambiables. La capacidad de cambio de cationes representa el total de cargas negativas, o lo que es lo mismo el número de cargas positivas que incorporan los cationes que vienen a fijarse.

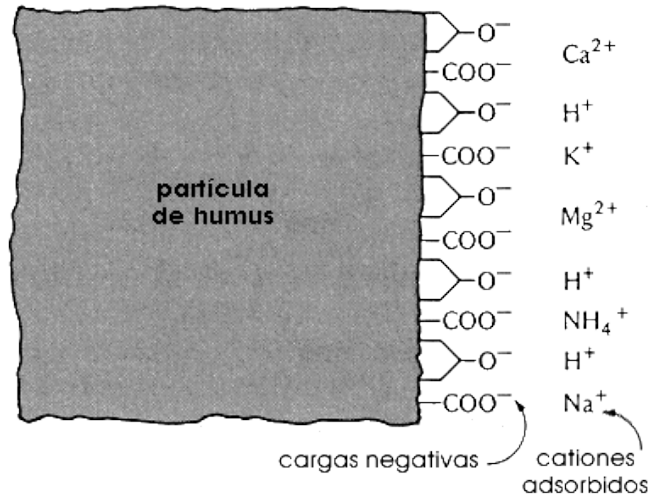


Figura II.13. Esquema representativo de los procesos de intercambio iónico donde se aprecian las disociaciones de los grupos OH^- y grupos -COOH (Brissio, 2005).

Tabla II.5. Capacidad de intercambio catiónico de algunos materiales particulados que son comunes en suelos.

Naturaleza de la partícula	CIC, meq/100g
Cuarzo y feldespatos	1-2
Óxidos e hidróxidos Fe y Al	4
Caolinita	3-15
Ilita y clorita	10-40
Montmorillonita	80-150
Vermiculita	100-160
Materia orgánica	300-500

No obstante, la naturaleza de los cationes de cambio puede modificar el valor de la capacidad de cambio, aumentándola o disminuyéndola, en función de su carga y de su tamaño. Los cationes divalentes, trivalentes al adsorberse aumentan la capacidad de cationes de cambio, mientras que los cationes de gran tamaño (radicales orgánicos) disminuyen la CIC al bloquear, por su tamaño, posiciones de cambio.

- pH. Los suelos presentan distinta capacidad de cambio en función del pH. A pH bajos los hidrogeniones están fuertemente retenidos en las superficies de las partículas, pero a pH altos los H^+ de los grupos carboxílicos primero y de los OH^- después, se disocian y los H^+ pueden ser intercambiados por cationes. Esto es la consecuencia de que la capacidad de cambio de cationes aumente con el pH. De manera análoga se asocia el potencial zeta (pZ).

Los cationes que frecuentemente ocupan las posiciones de cambio en los suelos son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , NH_4^+ , Mn^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} . En los suelos ácidos predominan H^+ y Al^{3+} , en los suelos alcalinos predominan las bases fundamentalmente el Na^+ y en los neutros el Ca^{2+} .



La relación en el complejo de cambio entre los cationes y el $H^+ + Al^{3+}$, expresado en %, representa el grado de saturación del suelo:

$$V = S/T \times 100,$$

siendo, T = capacidad de cambio. Mide la cantidad de bases de cambio ($T = S + Al^{3+} + H^+$) y $S = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+$, cuando $V > 50\%$ el suelo está saturado.

Si $V < 50\%$ el suelo se encuentra insaturado. Las posiciones de cambio están ocupadas principalmente por H^+ y Al^{3+} ; se trata de un medio pobre en nutrientes.

La importancia de la capacidad de cambio es que:

- ♦ Controla la disponibilidad de nutrientes para las plantas: K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , entre otros.
- ♦ Interviene en los procesos de floculación dispersión de arcilla y por consiguiente en el desarrollo de la estructura y estabilidad de los agregados.
- ♦ Determina el papel del suelo como depurador natural al permitir la retención de elementos contaminantes incorporados al suelo.

II.3. El agua y su relación con la agricultura.

II.3.1. Características de los suelos que afectan el movimiento de las aguas.

El punto de saturación del suelo se obtiene en el laboratorio, cuando se realiza la obtención del extracto de la pasta saturada. Se conoce o se considera como la máxima cantidad de agua que el suelo puede retener y es afectado por el contenido y tipo de arcillas y por la concentración de materia orgánica que éste tenga. Para un mismo tipo textural, el punto de saturación puede ser muy diferente debido a la variación que puede ocurrir con estos dos componentes del suelo. A partir de este dato se puede estimar indirectamente la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. El punto de saturación de un suelo va de menos de 10% para las arenas gruesas y hasta 150% para los suelos muy arcillosos o para los histosoles con muy elevado contenido de materia orgánica (Brissio, 2005).

El término capacidad de campo (CC) define la cantidad de agua que permanece en el suelo después que se ha detenido el flujo gravitacional. Esta condición se expresa como porcentaje del peso. La cantidad de agua presente en el suelo después de que las plantas llegan a marchitez permanentemente se denomina punto de marchitez permanente (PMP). En este punto todavía existe agua en el suelo, pero se encuentra retenida tan fuertemente que las plantas no la pueden utilizar. El agua disponible para la planta es aquella que se encuentra entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. El diagrama que se presenta a continuación muestra como varía la disponibilidad del agua con la textura del suelo (figura II.14).



Figura II.14. Relación entre la textura del suelo y la disponibilidad de agua. (Montiel et Blanco, 2001)

Los suelos arenosos no pueden almacenar la cantidad de agua que almacenan los suelos arcillosos. Sin embargo, un alto porcentaje del agua presente en suelos arenosos es disponible. Concluyendo, no existe una relación muy constante entre la textura del suelo y el agua disponible, como se demuestra en la figura II.14.

Los suelos de textura fina (arcillosos) se compactan fácilmente. Esto reduce el espacio poroso, lo cual limita el movimiento de agua y de aire en el suelo, dificultando el ingreso del agua de lluvia y facilitando la escorrentía superficial. Esta condición puede causar estrés de humedad aun cuando exista una alta cantidad de lluvia. Las arcillas son pegajosas cuando están húmedas y forman terrones duros cuando están secos. Por esta razón, es extremadamente importante el mantener un contenido apropiado de humedad cuando se realizan labores de labranza en suelos arcillosos (Doran et Zeiss, 2000). Los suelos arenosos son por naturaleza secos debido a que retienen poca cantidad de agua. Estos suelos son sueltos, con menor posibilidad de compactarse y son fáciles de trabajar. Sin embargo, los suelos que contienen un alto porcentaje de arena muy fina se pueden también compactar fácilmente.

Los suelos con alto contenido de limo son a menudo los más difíciles de todos, en términos de estructura. Las partículas se juntan estrechamente y se compactan muy fácilmente. El buen manejo ayuda a mantener o desarrollar una buena estructura en el suelo. El tamaño y la forma de los gránulos determinan la calidad de la estructura. La mejor estructura es la de tipo bloque y la granular (Karlen et al., 1996).

La estructura del suelo tiene una influencia marcada en el crecimiento de las raíces y de la parte aérea de la planta. A medida que el suelo se compacta, la proporción de espacios porosos grandes disminuye, el crecimiento radicular se detiene y la producción se reduce.



La diferencia entre CC y PMP representa la capacidad de retención de humedad aprovechable. La capacidad retentiva de humedad aprovechable es expresada en cm de lámina de agua para 30 cm de profundidad de suelo para varios tipos texturales, cuyo rango varía en función del tipo de arcilla, nivel de materia orgánica y de la estructura del suelo.

El agua es retenida en el suelo, principalmente, mediante un proceso de adsorción (potencial matricial) sobre la superficie de las partículas minerales, cuya intensidad de reacción depende de la superficie específica del suelo (SE); la tensión con la que el agua es adsorbida variará según el tipo de suelo, la presencia de materiales orgánicos y el contenido de agua (Pachepsky *et Rawls*, 1999). La SE se define como el área superficial por unidad de masa o volumen y se expresa en metros cuadrados por gramo (Carter *et Stewart*, 1986). Además, la SE influye sobre diversas propiedades físicas y químicas edáficas (Hillel, 1998), entre las que destacan la capacidad de intercambio catiónico, la adsorción de contaminantes y plaguicidas (Petersen *et al.*, 1996), la formación de complejos órgano-minerales (Mayer *et Xing*, 2001), y está íntimamente relacionada con los procesos biológicos que regulan la actividad de los microorganismos. El agua atrapada físicamente entre el espacio poroso de la fase sólida edáfica también constituye otro mecanismo por el cual el suelo es capaz de retener humedad, cuya relevancia está circunscrita a suelos con escaso contenido de arcillas (Pachepsky *et al.*, 2001).

El cambio de uso de suelo y las prácticas de manejo agrícola y forestal modifican las propiedades inherentes a su fertilidad física, lo cual repercute sobre el contenido de materia orgánica (MO) y la capacidad de almacenamiento de agua (Browman *et al.*, 1999; Lado *et al.*, 2004), debido a que se modifica la interacción entre las fracciones mineral y orgánica del suelo (Carter, 2004) y, por ende, el arreglo estructural de las partículas edáficas (Pagliali *et al.*, 2004).

Este impacto variará según la SE (Yariv *et Michaelian*, 2002) y alterará la capacidad productiva del suelo (Carter, 2004). Los materiales orgánicos y minerales edáficos están íntimamente relacionados en complejos organominerales (Liebig *et al.*, 2004), donde las moléculas de agua sirven de puentes entre estos dos componentes del suelo (Yariv *et Michaelian*, 2002). Por lo tanto, los aportes de materiales orgánicos incrementarán el tamaño y la estabilidad de agregados, fomentarán una mayor actividad microbiana y favorecerán la fertilidad física del suelo, en general (Carter *et Stewart*, 1996); a la vez, se modificará la hidrodinámica y la capacidad del suelo para almacenar agua disponible para los cultivos.

La estructura del suelo tiende a colapsarse de manera natural por efecto del agua de lluvia o riego y modifica las propiedades hidráulicas del medio (Or *et Ghezzehei*, 2002); sin embargo, esto se intensifica significativamente por el laboreo y más aún cuando hay un escaso reciclaje de materiales orgánicos en el agrosistema (Gicheru *et al.*, 2004). Por ello, las prácticas agrícolas constituyen un factor determinante del comportamiento hidráulico del suelo (Kribaa *et al.*, 2001),



por lo que es factible mejorar la capacidad productiva a través del incremento de la retención de humedad en el suelo. Para esto es fundamental considerar dentro del manejo agrícola la aplicación de residuos orgánicos (Francis *et Knight*, 1993; Moroizumi *et Horino*, 2004) y fomentar el mantenimiento de la interacción entre las reservas orgánicas y la fracción mineral (Carter, 2004).

II.3.2. Coloides del suelo y la retención de iones.

Los suelos se forman mediante los cambios producidos por el efecto de la temperatura y humedad en las rocas (procesos de meteorización). Algunos minerales y la materia orgánica se descomponen hasta llegar a formar partículas extremadamente pequeñas. Las reacciones químicas que ocurren a continuación reducen el tamaño de estas partículas hasta que no se pueden ver a simple vista. Las partículas más pequeñas se llaman coloides (Acevedo *et al.*, 2002).

Estudios científicos han determinado que los coloides arcillosos son cristales que se agrupan en forma de placas. En la mayoría de los suelos los coloides de minerales arcillosos son más numerosos que los coloides orgánicos. Los coloides son los responsables de la reactividad química del suelo. El tipo de material parental (roca madre) y el grado de meteorización determinan el tipo de arcilla presente en el suelo. Unas arcillas son más reactivas que otras y esta característica depende del material parental y de los procesos de meteorización. Cada coloide (arcilloso u orgánico) tiene carga negativa (-) que se desarrolla durante los procesos de formación. Esto significa que los coloides pueden atraer y retener partículas cargadas positivamente (+), de igual forma como los polos opuestos de un imán se atraen entre sí. Los coloides repelen a otras partículas cargadas negativamente, como también lo hacen los polos iguales de un imán (figura II.15).

Los cationes retenidos por el suelo pueden ser reemplazados por otros cationes. Esto significa que son intercambiables. Por ejemplo, el Ca^{+2} puede ser intercambiado por H^{+} y/o K^{+} y viceversa. El número total de cationes intercambiables que un suelo puede retener (la cantidad permitida por su carga negativa) se denomina capacidad de intercambio catiónico o CIC. Mientras mayor sea la CIC más cationes puede retener el suelo. Los suelos difieren en su capacidad de retener cationes intercambiables. La CIC depende de la cantidad y tipo de arcillas y del contenido de materia orgánica presentes en el suelo. Un suelo que tiene alto contenido de arcillas puede retener más cationes intercambiables que un suelo con bajo contenido de arcillas. La CIC se incrementa también a medida que la materia orgánica se incrementa.



Intercambio cationico

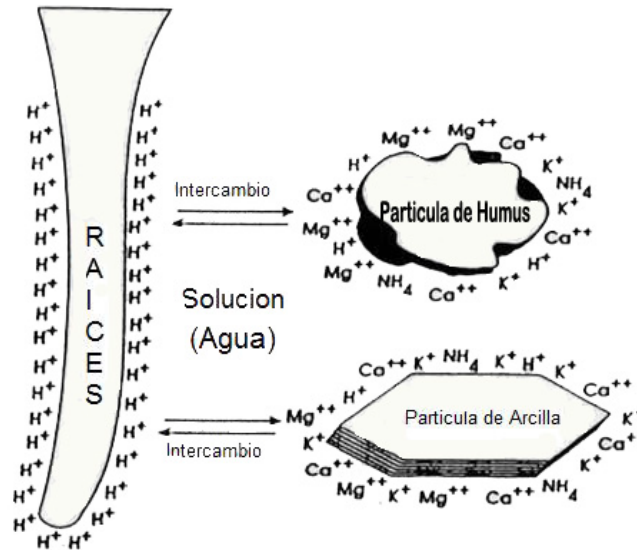


Figura II.15. Los cationes son atraídos por las arcillas y la materia orgánica del suelo; Los aniones en cambio son repelidos (Acevedo et al., 2002).

La CIC de un suelo se expresa en términos de miliequivalentes por 100 gramos de suelo y se escribe meq/100 g. Los minerales arcillosos tienen una CIC que generalmente varía entre 10 y 150 meq/100 g. La materia orgánica tiene valores que van de 200 a 400 meq/100 g. En consecuencia, el tipo y la cantidad de arcillas y materia orgánica influyen apreciablemente la CIC de los suelos.

Los valores de CIC son bajos en los lugares donde los suelos son muy meteorizados y tienen contenidos también bajos de materia orgánica. En los sitios donde el suelo es menos meteorizado, con niveles de materia orgánica a menudo altos, los valores de CIC pueden ser notablemente altos. Los suelos arcillosos con una alta CIC pueden retener una gran cantidad de cationes y prevenir la pérdida potencial por lixiviación (percolación). Los suelos arenosos, con baja CIC retienen cantidades más pequeñas de cationes. Esto hace que la época y las dosis de aplicación sean importantes consideraciones al planificar un programa de fertilización. Por ejemplo, no es muy aconsejable aplicar K en suelos muy arenosos en medio de la estación lluviosa cuando las precipitaciones pueden ser altas e intensas. Las aplicaciones de K se deben fraccionar (dividir) para prevenir pérdidas de lixiviación y erosión, especialmente en los trópicos húmedos. También es importante el fraccionar las aplicaciones de N para poder reducir notablemente las pérdidas por lixiviación y al mismo tiempo aportar este nutriente a las plantas en las épocas de mayor demanda. Esta práctica debe ser común en suelos arenosos así como en suelos de textura más fina.

El porcentaje de saturación de bases es el porcentaje de la CIC que está ocupado por los cationes principales. Este parámetro se utilizó en el pasado para desarrollar programas de fertilización con la idea de que ciertas "relaciones" o balances son necesarios para asegurar la absorción adecuada de nutrientes por



los cultivos para obtener rendimientos óptimos. Sin embargo, investigación científica ha demostrado que las relaciones entre cationes tienen poca utilidad en la gran mayoría de los suelos agrícolas. En condiciones de campo, las relaciones entre nutrientes pueden variar ampliamente sin efectos negativos, si los nutrientes están presentes individualmente en el suelo a niveles suficientes para soportar un crecimiento óptimo de la planta. No existe un mecanismo exacto de retención de aniones en el suelo. Por ejemplo, el nitrato (NO_3^-) es completamente móvil y se desplaza libremente en el agua del suelo. Cuando llueve abundantemente se mueve hacia abajo en el perfil del suelo con el exceso de agua. En condiciones climáticas extremadamente secas se mueve hacia arriba con el agua, produciendo acumulaciones de NO_3^- en la superficie.

El ion sulfato (SO_4^{-2}) puede ser retenido con poca fuerza en algunos suelos y bajo ciertas condiciones. A pH bajo se pueden desarrollar cargas positivas en los extremos rotos de algunas arcillas donde se retiene SO_4^{-2} . Los suelos que contienen óxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al) hidratados, sea en la capa superficial o en el subsuelo, retienen algo de SO_4^{-2} en las cargas positivas desarrolladas en la superficie de estos coloides. Esta retención es mínima cuando el pH es mayor que 6.0. La materia orgánica en algunas ocasiones también desarrolla cargas positivas que atraen SO_4^{-2} (Volveré *et* Amézquita, 2009).

Además de la retención electrostática en los sitios con carga positiva, el SO_4^{-2} puede ser retenido al reaccionar con metales que también están retenidos (absorbidos) en la superficie de los coloides del suelo. Por otro lado, grandes cantidades de SO_4^{-2} se pueden retener por acumulación de yeso (sulfato de calcio) en regiones áridas y semiáridas (prácticas de encalado con yeso agrícola).

II.4. Uso de indicadores e índices para evaluación de calidad de los suelos.

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y el Desarrollo - Río '92 (UNCED) - marcó un hito muy especial al establecer la necesidad de desarrollar y aplicar diferentes metodologías para determinar el estado del ambiente y monitorear los cambios ocurridos a nivel local, nacional, regional y global. La determinación de estos cambios podría ayudar a realizar una mejor evaluación de las dimensiones de los diferentes problemas ambientales, identificar y evaluar los resultados de la aplicación de las convenciones internacionales y los programas de acción, como así también, orientar las políticas nacionales. La aplicación del Capítulo 40 de la Agenda 21 condujo al desarrollo de diversas metodologías que determinaron el uso generalizado de indicadores e índices para la evaluación de la calidad ambiental, calidad de suelos, sustentabilidad, desarrollo sustentable, riesgo, vulnerabilidad, planificación territorial, entre otros (Cantú *et al.*, 2002).

El antecedente más importante surgió de la Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD, 1991) cuando publicó un set preliminar de indicadores ambientales. Posteriormente, otras organizaciones han desarrollado programas donde se establecieron listas de indicadores para evaluar la calidad



ambiental, tales como, FAO, Banco Mundial, UN Development Program, UN Environmental Program.

En la ciencia del suelo, Blum y Santelises (1994) describieron el concepto de sustentabilidad y resiliencia del suelo basado en seis funciones ecológicas y humanas: el suelo como productor de biomasa; el suelo como reactor con filtros; el suelo como buffer y como transformador de materia para proteger el ambiente, el agua subterránea y la cadena de alimentos de la contaminación; el suelo como hábitat biológico y reserva genética; el suelo como medio físico y el suelo como fuente de recursos y de herencia cultural. Estos conceptos y los sugeridos por Warketin (1996) fueron las bases a partir de las cuales la Soil Science Society of America estableció el concepto de calidad del suelo (Karlen *et al.*, 1996). Doran *et Parkin* (1994, 1996) y Doran *et al.* (1996) establecieron indicadores cuantitativos de calidad del suelo a partir de estos conceptos.

Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante. Los indicadores deben ser preferiblemente variables cuantitativas, aunque pueden ser cualitativas o nominales o de rango u ordinales, especialmente cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa, o el atributo no es cuantificable, o cuando los costos para cuantificar son demasiado elevados (Volveré *et Amézquita*, 2009). Las principales funciones de los indicadores son: evaluar condiciones o tendencias, comparar transversalmente sitios o situaciones, para evaluar metas y objetivos, proveer información preventiva temprana y anticipar condiciones y tendencias futuras. Los indicadores deben ser:

- Limitados en número y manejables por diversos tipos de usuarios;
- Sencillos, fáciles de medir y tener un alto grado de agregación, es decir, deben ser propiedades que resuman otras cualidades o propiedades;
- Interdisciplinarios; en lo posible deberán contemplar la mayor diversidad de situaciones por lo tanto incluir todo tipo de propiedades de los suelos (químicas, físicas, biológicas, etc.);
- Tener una variación en el tiempo tal que sea posible realizar un seguimiento de las mismas, asimismo, no deberán poseer una sensibilidad alta a los cambios climáticos y/o ambientales pero la suficiente como para detectar los cambios producidos por el uso y manejo de los recursos (Gallopín, 1995; Doran *et Parkin*, 1996; Doran *et Zeiss*, 2000; Volveré *et Amézquita*, 2009).

Segnestam (2002) a partir de la experiencia realizada por el Banco Mundial señaló la importancia de establecer la línea de base o de inicio de una actividad que puede impactar positiva o negativamente sobre el ambiente; umbrales para controlar o hacer el seguimiento de impactos negativos que no deben exceder un



predeterminado umbral y además objetivos o metas que permitan evaluar si el impacto positivo de una respuesta es suficientemente largo.

Se han desarrollado listas de indicadores de uso “universal” pensando en todas las situaciones posibles y todos los suelos posibles (Doran *et al.*, 1994, 1996). Por otra parte, se han presentado listas pensadas para situaciones regionales o locales (Brejda *et al.*, 2000; Cantú *et al.*, 2002; Lilburne *et al.*, 2004). Segnestam (2002) señaló la conveniencia de utilizar indicadores locales para evaluar a nivel de escala mayor (regiones, provincias, municipios).

II.5. Bibliografía.

- Acevedo-Sandoval, O.A., M. Cruz-Sánchez, y E. Cruz-Chávez. (2002). Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico. *Agrociencia* 36: 401-409.
- Álvarez, CR; FH Gutierrez Boem; MA Taboada; P Prystupa; JF Ocampo. (2004). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos manejos en el norte de Buenos Aires. Pp.238. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Blum, WEH and AA Santelises. (1994). A concept of sustainability and resilience based on soil functions. Pp. 535-542. *In: DJ.*
- Botta, GF; D Jorajuria; R Balbuena and H Rosatto. (2004). Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect of soybean (*Glycine max L.*) yields. *Soil Till. Res.* 78(1):53-78.
- Brejda, JJ; TB Moorman; DL Karlen and TH Dao. (2000). Identification of regional Soil Quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:2115-2124.
- Brissio, P. A. 2005. Evaluación preliminar del estado de contaminación en suelos de la provincia del Neuquén donde se efectúan actividades de explotación hidrocarburífera. Tesis de Maestría en Saneamiento y Protección Ambiental. Instituto Superior de Salud y Ambiente. Universidad Nacional del Comahue. Colombia.
- Browman, R. A., M. F. Vigil, D. C., Nielsen, and R. L. Anderson. (1999). Soil organic matter changes in intensively cropping dryland systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 186-191.
- Cantú, MP; AR Becker; JC Bedano; TB Musso and HF Schiavo. (2002). Evaluación de la calidad ambiental y calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD. 6 pp.
- Carter, D. L., M. Mortland, and W. Kemper. (1986). Specific surface. pp. 413-423. *In: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. Agronomy 9. Part 1. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.*



- Carter, M. R. (2004). Soil quality as an indicator of sustainable tillage practices. *Soil Tillage Res.* 78: 129-130.
- Carter, M. R. and B.A. Stewart. (1996). Structure and organic matter storage in agricultural soils. Lewis/CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Cong, W. 1994. Geología física. Ed. Limusa. México. p. 18-26.
- Deshpande, V.S., Fleck, N.A., Ashby, M.F., (2001), Effective properties of the octet-truss lattice material: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49, 1747–1769
- Díaz-Zorita, M. (2000). Manejo del agua y de la nutrición mineral. Curso de actualización "Manejo del cultivo de girasol". p. 79-94. INTA, E.E.A. Gral. Villegas, Argentina.
- Díaz-Zorita, M; GA Duarte and JH Grove. (2002). A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65 (1):1-18.
- Doran, JW and MR Zeiss. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.* 15: 3-11.
- Doran, JW and TB Parkin. (1994). Defining and assessing soil quality. *In: JW Doran; DC Coleman; DF Bezdick & BA Stewart (eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication N° 35. Wisconsin, USA.*
- Doran, JW and TB Parkin. (1996). Quantitative indicators of soil Quality: a minimum data set. Pp. 25-37. *In: Methods for assessing Soil Quality, SSSA Special Publication N° 49, Wisconsin, USA.*
- Doran, JW; M Sarrantonio and MA Liebig. (1996). Soil Health and sustainability. Pp.1-54. *In: LD Sparks (ed.). Advances in Agronomy, Vol 56. Academic Press Inc. San Diego CA.* Doran, JW & M Safley. 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. Pp. 1-28. *In: C Pankhurst; BM Doube & VVSR Gupta (eds.). Biological indicators of soil health. CAB International, Wallingford.*
- Dorronsoro, C. F., J. Aguilar, E. Fernández, J. Fernández, I. García, F. Martín, M. Simon. (2004). Soil pollution by a pyrite mine spill in Spain: evolution in time. *Environmental Pollution* 132:395–401
- FAO. (2000). Manual on integrated soil management and conservation practices. Land and water, bulletin 8, FAO, Rome. P. 204.
- Francis, G. S. and T. L. Knight. (1993). Long-term effects of conventional and no-tillage on selected soil properties and crop yields in Canterbury, New Zealand. *Soil Tillage Res.* 26:193-210.
- Ferlini, H. (2005). Digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi. Manuali e linee guida 13/2005. Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144.



- Gallopin, G. (1997). Indicators and their use :information for decision making. Part 1 Introduction. *In: B Moldan and S Billharz (eds.). Sustainability indicators.* Wiley, Chichester-N. York.
- Gibbs, RJ and JB Reid. (1988). A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 8:123-149.
- Gicheru, P., Ch. Gachene, J. Mbuvi, and E. Mare. (2004). Effects of soil management practices and tillage systems on surface soil water conservation and crust formation on a sandy loam in semi-arid Kenya. *Soil Tillage Res.* 75: 173-184.
- Glinski, J and J Lipiec. (1990). *Soil Physical Conditions and Plant Roots.* CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida, USA. 250 pp.
- Gupta, SC and RR Allmaras. (1987). Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6:65-100.
- Hamilton-Manns, M; CW Ross; DJ Horne and CJ Baker. (2002). Subsoil loosening does little to enhance the transition to notillage on a structurally degraded soil. *Soil Till. Res.* 68 (2):109-119.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics.* Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Isla, R. (2004). Efectos de la salinidad de los suelos sobre los cultivos de cebada (*Hordeum vulgare* L.). Análisis de caracteres morfo-fisiológicos y su relación con la tolerancia a la salinidad. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida. Salamanca. España, p.5-17.
- Kabata-Pendias, A. (2000). *Trace elements in soils and plants.* Third Edition. CRC Press, Inc. Boca Raton. USA. pp. 413.
- Karlen, DL; MJ Mausbach; JW Doran; RC Cline; RF Harris & GE Schuman. (1996). *Soil Quality; concept, rationale and Research Needs.* *Soil Science Society of America, Committee.*
- Kay, BD. (1990). Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 12:1-52.
- Kribaa, M., V. Hallaire, P. Curmi, and R. Lahmar. (2001). Effect of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate. *Soil Tillage Res.* 60:43-53.
- Lado, M., A. Paz, and M. Ben-Hur. (2004). Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, soil formation, and soil loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 935-942.
- Liebig, M. A., D. L. Tanaka, and B. J. Wienhold. (2004). Tillage and cropping effects on soil quality indicators in northern Great Plains. *Soil Tillage Res.* 78: 131-141.



- Lilburne, I; G Saprling and L Schipper. (2004). Soil quality monitoring en New Zealand development of an interpretative framework. *Agric. Ecosyst. Environ.* 104: 533-544.
- Logsdon, SD; TC Kaspar and CA Cambardella. (1999). Depthincremental properties under no-till or chisel management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(1):197-200.
- Malvern Instrument, Inc. (2004). Potencial Zeta. Un curso completo en cinco minutos. Ed. Malver Inst. Catálogo Zeta-Meter. Westborough, MA 01581-1042, USA.
- Marcano, F., J. Guédez y R.P. de Roberti. (1997). Características Morfológicas y Físicas del Suelo. Serie Monografía N° 14. Departamento de Suelos, Decanato de Agronomía, UCLA. 111 p.
- Mayer, L. and B. Xing. (2001). Organic matter–surface area relationships in acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 250-258.
- Montiel, A. M.; Blanco, R. (2001). Métodos de optimización de muestreo en los estudios de las propiedades físicas del suelo. *Edafología. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo.* Vol. 8(2), p.41-49.
- Moroizumi, T. and H. Horino. (2004). Tillage effects on subsurface drainage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1138-1144.
- Ochoa, G.; Malagón, D.; Oballos, J. (2008). Influencia del material parental y del bioclima en la pedogénesis de la cuenca media y alta del río Motatán. Mérida-Trujillo. Venezuela. *Agronomía Trop.* 58(2): 125-140.
- OECD. (1991). Environmental Indicators: A preliminary Set, OCDE, Paris. Personal Laboratorio Salinidad. 1982. Suelos Salinos y Sódicos. Ed. Limusa, Mexico. 172 pp.
- Or, D. and T. A. Ghezzehei. (2002). Modeling post–tillage soil structural dynamics: a review. *Soil Tillage Res.* 64: 41-59.
- Pachepsky, Y. and A. Rawls. (1999). Accuracy and reliability of pedotransfer function as affected by grouping soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1748-1757.
- Pachepsky, Y., A. Rawls, and J. Gimenez. (2001). Comparison of soil water retention at field and laboratory scales. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 460:462.
- Pagliali, M., N. Vignozzi, and S. Pellegrini. (2004). Soil structure and effect of management practices. *Soil Tillage Res.* 79: 131-143.
- Perdomo, C. (2005). Calidad de las aguas y su relación con los sistemas agrícolas. *Ing. Agric.* 15(2):87-95.
- Petersen, W., P. Moldrup, H. Jacobsen, and D. Rolston, (1996). Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties. *Soil Sci.* 161: 9-20.



- Ramírez, J. A., Grundvig, S. (2000): Causes of geochemical diversity in peraluminous granitic plutons: the Jálama pluton, Central-Iberian Zone (Spain and Portugal). *Lithos*, 50, 171-190.
- Segnestam, L. (2002). Indicators of Environmental and Sustainable Development. Theories and Practical Experience, *Environmental Economic Series*, Paper N° 89, 61 pp. World Bank, Washington DC.
- Seoánez, M. (1999). Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión. Mundi Prensa Libros S.A., ISBN 84-7114-806-4.
- Urbano, Terrón P. (1992). Tratado de fitotecnia general. Editorial mundi prensa, p. 374.
- Volveré, B.; Amézquita, E. (2009). Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *Acta Agron. (Palmira)* 58(1): 35-39.
- Warkentin, BP. (1996). Overview of soil quality indicators. Pp. 1-13. *In: GM Cohen & HS Vanderpluym (eds.)*. Proc. Soil Quality Assessment for the Prairies, Agric. Canada, Edmonton.
- Yariv, S. and K. H. Michaelian. (2002). Structure and surface acidity of clay minerals. pp. 1-38. *In: S. Yariv and H. Cross (eds.)*. Organo-clay complexes and interactions. Marcel Dekker. New York, NY. USA.
- Zysset, M., P. Blaser, J. Luster, and A.U. Gehring. (1999). Aluminum solubility control in different horizons of a podsol. *Soil Sci. So. Am. J.* 63: 1106-1115.

Sitios internet

- <http://edafologia.ugr.es>, abril 2010.
- <http://www.ttevisual.com/geography/content4.asp>
- <http://www.tesis.bioetica.org/pab2-1.htm>



III. El cultivo de cebada (*Hordeum distichum* L.).

III.1. El cultivo de cebada. Generalidades.

La cebada ocupa el cuarto lugar en importancia entre los cereales, después del trigo, maíz y arroz. La razón de su importancia se debe a su amplia adaptación ecológica y a su diversidad de aplicaciones. En la tabla III.1 se muestran los principales países productores a nivel mundial. México aparece en el lugar 54 en el año 2009 con una producción de 0.534 millones de toneladas del ciclo primavera-verano por sistema de temporal.

Tabla III.1. Principales países productores a nivel mundial en cebada de temporal, ciclo primavera-verano. México ocupó el lugar 54 en el año 2009 (http://reportes.siap.gob.mx/Agricola_siap/ResumenProducto., 2009).

Países	Producción año 2009 (millones de toneladas)
Alemania	13,589.000
Australia	5,893.000
Canadá	11,103.300
República Checa	1,850.000
China	4,000.000
Dinamarca	4,100.000
España	6,944.500
E.E.U.U.	5,737.510
Finlandia	1,850.000
Francia	9,851.000
Irán	1,400.000
Kazajstán	2,330.000
Marruecos	1,216.000
Polonia	3,339.747
Reino Unido	6,690.000
Suecia	1,600.000
Turquía	6,600.000
Ucrania	7,100.000
Uruguay	225.200

Fuente: F.A.O.

Su cultivo se conoce desde tiempos remotos y se supone que procede de dos centros de origen situados en el Sudeste de Asia y África septentrional. Se cree que fue una de las primeras plantas domesticadas al comienzo de la agricultura. En excavaciones arqueológicas realizadas en el valle del Nilo se descubrieron restos de cebada, en torno a los 15,000 años de antigüedad, además los descubrimientos también indican el uso muy temprano del grano de cebada molido.

La cebada pertenece a la familia *Poaceae*, es una planta monocotiledónea anual. Se distinguen por el número de espiguillas que quedan en cada diente del raquis. Si queda solamente la espiguilla intermedia, mientras abortan las laterales, tendremos la cebada de dos carreras (*Hordeum distichum* L.); si aborta la espiguilla central, quedando las dos espiguillas laterales, tendremos la cebada de cuatro carreras (*Hordeum tetrastichum*); si se desarrollan las tres espiguillas tendremos la cebada de seis carreras (*Hordeum hexastichum*). Ambas son empleadas para la obtención de cerveza y como forraje para la alimentación



animal. Es el segundo cultivo en importancia socioeconómica del estado de Hidalgo. En la figura III.1 se observa un esquema representativo del desarrollo de la misma (Agricultural Research Service US, 1988). Su período vegetativo comprende de 100 a 120 días.

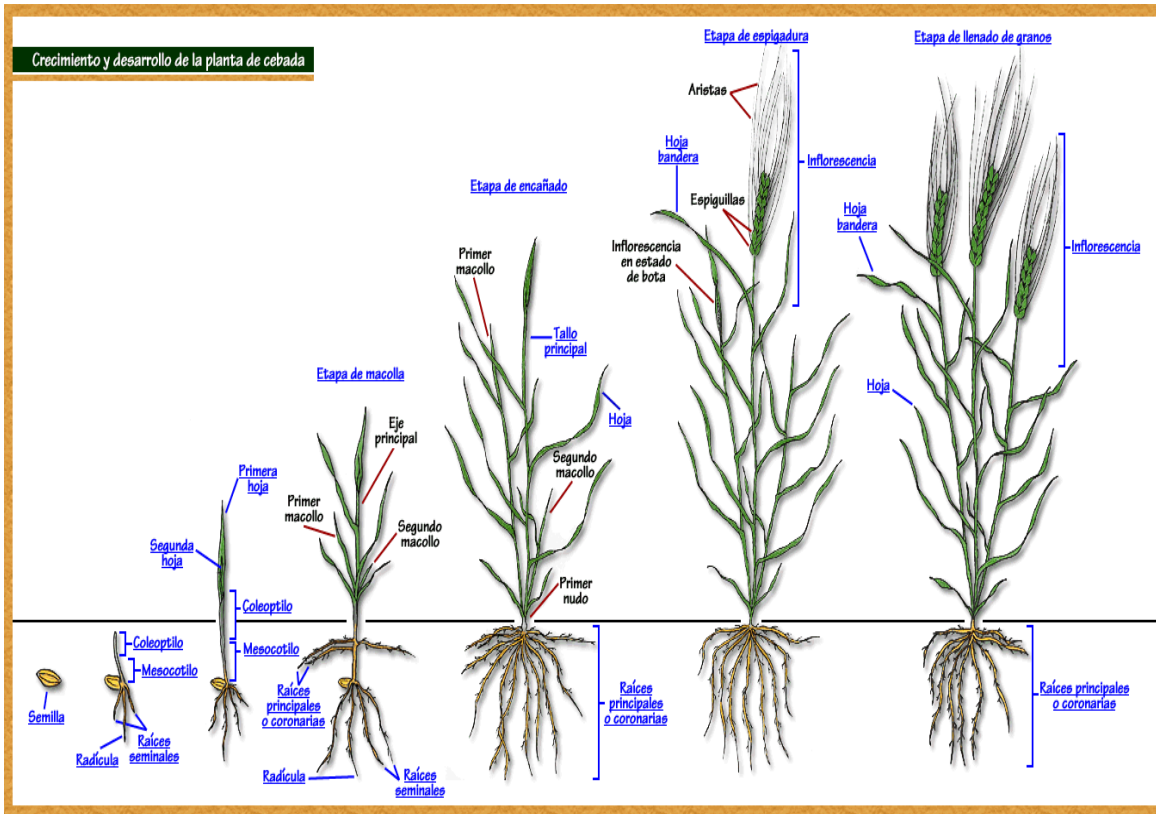


Figura III.1. Etapas del desarrollo y crecimiento de la cebada (*Hordeum distichon* L) Agricultural Research Service US Department of Agricultura, 1988; USDA Agricultural Research Service, www.ars-grin.gov/npgs/tax., 2007.

-Raíces: el sistema radicular es fasciculado, fibroso y alcanza poca profundidad en comparación con el de otros cereales. Se estima que un 60% del peso de las raíces se encuentra en los primeros 25 cm del suelo y que las raíces apenas alcanzan 1.20 m. de profundidad. Las raíces principales comienzan a formarse al estado de aparición de la tercera hoja, a partir de la corona ubicada en el subnudo correspondiente al punto de unión del mesocotilo con el coleóptilo (ver figura III.1). Posteriormente todos los subnudos presentes van generando, poco a poco, este tipo de raíces a partir de sus yemas (Islas, 2004).

-Tallo: el tallo es erecto, grueso, formado por unos seis u ocho entrenudos, los cuales son más anchos en la parte central que en los extremos junto a los nudos. La altura de los tallos depende de las variedades y oscila desde 0.50 cm. a un metro. El mesocotilo, es de una estructura tubular, de color blanco y semejante a un tallo, aparece inmediatamente, una vez que éste rompe la cubierta seminal. La elongación del mesocotilo, a partir de la semilla, permite dejar a la plántula a una distancia de 1.0 a 2.5 cm. de la superficie del suelo. El coleóptilo, se aproxima a la



superficie del suelo a través de la elongación del mesocotilo; éste, una vez que termina su elongación, permite que se reanude el crecimiento del coleóptilo y que se consiga con ello la emergencia de las plántulas. El coleóptilo, de estructura puntiaguda y consistente, inmediatamente luego de lograr la emergencia se abre para dar paso a la primera hoja. El tallo principal se origina entonces en forma subterránea a partir del punto de crecimiento, el cual, inicialmente, se ubica en el lugar de unión del mesocotilo con el coleóptilo. El tallo principal permanece bajo el suelo, creciendo lentamente hasta alcanzar la superficie; poco antes de que esto ocurra y aún bajo el nivel del suelo, se produce un ligero engrosamiento del primer nudo, hecho que marca el comienzo de la fase de encañado (Islas, 2004).

-Hojas: la cebada es una planta de hojas estrechas y color verde claro. La planta de cebada suele tener un color verde más claro que el del trigo y en los primeros estadios de su desarrollo la planta de trigo suele ser más erguida. Las hojas de las plantas de cebada son más largas que las del trigo, siendo en general glabras y rara vez pubescentes; su ancho varía entre 5 y 15 mm. Los cultivares primaverales (primavera-verano) se caracterizan por presentar hojas lisas; los cultivares invernales (otoño-invierno), por su parte, presentan hojas rizadas y más angostas. Las hojas están compuestas por una vaina, una lámina, dos aurículas y una lígula. Las hojas, desde un punto de vista morfológico, pueden dividirse en tres grupos:

- a) Primera hoja: la lámina es de punta redondeada; tiene aurículas reducidas y presenta una pequeña vaina.
- b) Hojas ubicadas entre la primera y la superior: tienen una lámina de mayor crecimiento y terminan en punta aguda.
- c) Hoja superior o bandera: en general presenta una lámina pequeña y una vaina mucho más larga que las hojas que la preceden.

A partir de los subnudos del eje principal se producen brotes secundarios llamados macollos, los cuales comienzan a emerger cuando las plantas presentan tres hojas; en la medida que crecen van generando su propio sistema de raíces, logrando así independizarse de la planta que les dio origen. La cebada presenta una producción de macollos similar a la del trigo, obteniéndose en el caso de las cebadas primaverales, que son las más cultivadas, un promedio de dos a tres macollos por planta. Sin embargo, la muerte de macollos más pequeños, una vez que se inicia la floración en el tallo principal, y la competencia por la luz, que se genera sobre los macollos que se encuentran atrasados en su desarrollo, determinan que en promedio se obtenga solamente un macollo productivo por planta.

-Flores: las flores tienen tres estambres y un pistilo de dos estigmas. Es autógama. Las flores abren después de haberse realizado la fecundación, lo que tiene importancia para la conservación de los caracteres de una variedad determinada. Las inflorescencias corresponden a las espigas, las cuales se



caracterizan por ser compactas y generalmente barbadas. En la variedad *Hordeum distichon* L. las espigas son largas y delgadas (figura III.2); en las variedades *Hordeum hexastichon* L. o *Hordeum sativum* Jess., son más anchas y de menor longitud (Aguilar et Schwentesius, 2004).

-Fruto: el fruto es un cariósipide, con las glumillas adheridas, salvo en el caso de la cebada desnuda. La semilla de la cebada (grano) es parte del fruto, en el cual las paredes del ovario (pericarpio) y la cubierta seminal (testa), están estrechamente unidas, siendo inseparables; el fruto, por lo tanto, es de carácter indehiscente. La semilla o grano, para poder expresar su germinación a través de la aparición de la radícula, debe pasar desde aproximadamente un 10% de humedad interna a un 40%. Luego que la radícula alcanza alrededor de 4 cm. de longitud, comienza la aparición de las raíces seminales; éstas, junto con la radícula, conforman el sistema radical primario, el cual pierde prácticamente toda importancia en la medida que comienza el desarrollo de las raíces principales o coronarias.



Figura III.2. Espiga de *Hordeum distichon* L. (cebada cervecera), a la izquierda y espiga de *Hordeum hexastichon* L. (cebada forrajera), a la derecha (http://www.uc.cl/sw_educ/cultivos/cereales/cebada/F403, 2010)

La etapa de encañado podrá determinarse en forma oportuna en la medida que haya una atención permanente sobre el desarrollo del cultivo; sólo así podrá detectarse el primer nudo antes de que se haga presente sobre la superficie del suelo. En ese momento es posible visualizar la futura espiga, la cual se encuentra justo sobre dicho nudo, presentando un tamaño de aproximadamente 5 mm. De ahí en adelante se produce un rápido crecimiento de los tallos, los cuales, durante la etapa de encañado, van estructurándose en base a la formación de nuevos nudos e internados, pudiendo alcanzar una altura que fluctúa entre 0.6 y 1.5 m. (Aguilar et Schwentesius, 2004).

La etapa de espigadura comienza al iniciarse a partir del denominado desembuchamiento de la espiga a través de la vaina, de la hoja bandera u hoja superior. Primeramente, asoma la punta de la espiga y luego viene una elongación gradual de ésta, hasta que alcanza su completa expresión en la posición más alta



de la planta. La espiga, que corresponde a la prolongación del último internudo del tallo, presenta un raquis central que está compuesto por 10 a 30 nudos; su color, en tanto, puede variar desde verde rojizo a negruzco. La espiga está formada por espiguillas, las cuales van dispuestas en tres de forma alterna a ambos lados del raquis. Si todas las espiguillas se presentan fértiles se originará una espiga de seis hileras (*Hordeum sativum* Jess. L.); si por otra parte, sólo resultan fértiles las espiguillas centrales, se originará una espiga de dos hileras (*Hordeum distichon* L.) (Dendy *et* Dobraskczyk, 2004).

Los granos inicialmente presentan un contenido altamente acuoso; luego de alcanzar su máxima longitud van aumentando gradualmente la densidad de su contenido, el cual, en primera instancia se torna lechoso y posteriormente pastoso, éste sigue creciendo hasta alcanzar la madurez fisiológica; que se produce cuando los granos alcanzan un 40% de humedad; en ese momento el último internudo se presenta seco y las glumas han ido perdiendo su color verde. Una vez lograda la madurez fisiológica, sólo resta que las semillas pierdan humedad hasta llegar a un 14% (estado de grano duro), para que así puedan ser trilladas en óptimas condiciones.

Las exigencias en cuanto al clima son muy pocas, por lo que su cultivo se encuentra muy extendido, aunque crece mejor en los climas frescos y moderadamente secos. La cebada requiere menos unidades de calor para alcanzar la madurez fisiológica, por ello alcanza altas latitudes y altitudes. En Europa llega a los 70° de latitud Norte, no sobrepasando en Rusia los 66°, y en América los 64°. En cuanto a la altitud, alcanza desde 1200 m a 1.800 m en Suiza a 3.000 m en Perú, ya que es entre los cereales, el que se adapta mejor a las altitudes más elevadas (teniendo la precaución de tomar las variedades precoces). Para germinar necesita una temperatura mínima de 6°C. Florece a los 16°C y madura a los 20°C. Tolera muy bien las bajas temperaturas, ya que puede llegar a soportar hasta -10°C. En climas donde las heladas invernales son muy fuertes, se recomienda sembrar variedades de primavera, éstas comienzan a desarrollarse cuando ya han pasado los fríos más intensos.

Por su composición proximal el grano de cebada está constituido por carbohidratos en su mayor porcentaje, siendo de éstos la fracción más importante los almidones. En la tabla III.2 se observa la composición del grano por cada 100 g de producto.

Tabla III.2. Composición del grano de cebada por 100 g

Proteínas	10.0
Materia grasa	1.8
Hidratos de carbono	66.5
Celulosa	5.2
Materias minerales	2.6
Agua	14.0

La composición de la parte de follaje o comúnmente conocida como paja, está constituida por celulosa y materia no nitrogenada principalmente; en la tabla III.3 se muestra esta composición.



Tabla III.3. Composición de la paja por 100 g

Proteínas	1.9
Materia grasa	1.7
Materia no nitrogenada	43.8
Celulosa	34.4
Cenizas	4.0
Agua	14.2

Sin embargo, la composición de la parte de follaje o paja sin secarse, es decir verde, está constituida fundamentalmente por agua (un 80% m/m aproximadamente es agua) como se observa en la tabla III.4.

Tabla III.4. Composición de la cebada verde por 100 g

Proteínas	2.5
Materia grasa	0.5
Materia no nitrogenada	8.8
Celulosa	5.6
Cenizas	1.7
Agua	80.9

III.2. Producción y productividad de la cebada en el estado de Hidalgo.

En la tabla III.5 se dan los datos de superficies sembradas y cosechadas a nivel del estado de Hidalgo entre los años 2006 y 2010. Así mismo los niveles de producciones estimados y reales obtenidos en estos años; se observa que de la estimación al real no existieron grandes diferencias en el año 2006, siendo éste un año productivo y con solamente un 3% de pérdidas entre lo sembrado y cosechado. Sin embargo en los años 2007 y 2008 no fue así.

Estos rendimientos a nivel estatal y comparado a nivel nacional, resultan ser los mejores y en sentido general muy próximo a los niveles que se obtienen en el estado de Tlaxcala, primer productor Nacional (2.197 como promedio de estos dos años).

Tabla III.5. Resultados de siembra y cosecha de cebada en los años 2006-2010 en el estado de Hidalgo. Primavera-Verano, sistema de riego Temporal.

SITUACION DE LOS AÑOS 2006-2010

Producto CEBADA GRANO	Superficie (ha)		Producción (ton)		Rendimiento (ton/ha)	
	sembrada	Cosechable (% Pérdida)	Estimada	obtenida	estimado	obtenido
Julio 2006	121,556	118,327 (2.7)	270,078	225,124	2.222	2.174
Julio 2007	112,178	105,108 (6.3)	211,168	178,209	1.983	1.695
Julio 2008	118,879	113,303 (4.7)	242,087	198,975	2.206	2.137
Julio 2009	124,634	75,378 (39.5)*	202,628	98,138 (48.4)	2,018	1.302 (64.5)
Julio 2010	110,447	103,578 (6.2)	230,524	198,364 (86.1)	2,050	1.915 (93.4)

Fuente: Elaborado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), con información de las Delegaciones de la SAGARPA

(Tomado de <http://www.siap.gob.mx/>, mayo 2011)

*Pérdida por excesos de lluvias y destrucción de cosechas



Cabe destacar que en los municipios de Almoloya, Apan y Emiliano Zapata, de este estado de Hidalgo, se alcanzaron los rendimientos más altos a nivel nacional de cebada en grano en el año 2006 (2.800 T/ha en Almoloya, 2.600 T/ha en Apan y 2.400 T/ha en Emiliano Zapata). Para el año 2007 la producción disminuyó apreciablemente y los rendimientos de forma similar experimentaron grandes descensos hasta niveles de 1.893 T/ha (disminución de un 27% en rendimientos globales). Para los años 2008 y 2009 se estimaron rendimientos entre 2.20 y 2.08 T/ha para los municipios antes mencionados; sin embargo en el año 2008 sólo se alcanzó rendimientos de 2.00 T/ha (por debajo de la media Nacional).

El año 2009 presentó un colapso productivo, con pérdidas en cosecha y producciones de cerca del 40%. Con respecto a los rendimientos por hectárea para este mismo año, se puede observar en la tabla III.5 que se presentan irregularidades entre estimados y reales y de igual manera en el año 2009 se produjo el mayor descenso en rendimientos. En el año 2010 se vio afectada la superficie sembrada en 14 mil ha menos pero se recuperaron los niveles de cosecha del año 2007 y se superó el porcentaje de producciones obtenidas y los rendimientos por ha.

III.3. Efectos del suelo. Incidencia en la producción de cebada.

La cebada prefiere tierras fértiles, pero puede tener buenas producciones en suelos poco profundos y pedregosos, con tal de que no falte el agua al comienzo de su desarrollo. No le van bien los terrenos demasiado arcillosos y tolera bien el exceso de salinidad en el suelo. Los terrenos compactos no le van bien, dificulta la germinación y las primeras etapas del crecimiento de la planta.

Los suelos arcillosos, húmedos y encharcados, son desfavorables para la cebada, aunque en ellos se pueden obtener altos rendimientos si se realiza un buen laboreo y se conserva la humedad del suelo. Los suelos con excesivo nitrógeno inducen el encamado e incrementan el porcentaje de nitrógeno en el grano hasta niveles inapropiados, cuando se destina a la fabricación de malta para cerveza.

En cuanto al calcio, la cebada es muy tolerante, vegetando bien incluso en suelos muy calizos, por lo que muchas veces a este tipo de suelos es corriente llamarlos "cebaderos", si bien tiene un amplio margen en cuanto a tolerancia de diferentes valores de pH. A las cebadas cerveceras les van bien las tierras francas, que no sean pobres en materia orgánica, pero que su contenido en potasa y cal sea elevado. La cebada es el cereal de mayor tolerancia a la salinidad, estimándose que puede soportar niveles de hasta 8 mmhos/cm, en el extracto de saturación del suelo, sin que sea afectado el rendimiento (López *et al.*, 2005).

La cebada de secano se cultiva normalmente en aquellas tierras que, por ser más ligeras y con menor poder retentivo del agua, no son idóneas para el trigo.

En lo que se refiere a regadío, permite una siembra más tardía que el trigo, siendo una especie muy adecuada para ir detrás de cultivos que pueden ver retrasada su



recolección al invierno, como son el maíz, remolacha, etc. A su vez, al recolectarse antes que el trigo, es más adecuada que aquél en aquellas zonas en que pueda sembrarse una segunda cosecha, como maíz o girasol (Aguilar *et* Schweutesius, 2004).

Las características fundamentales necesarias a tener en cuenta a la hora de elegir una variedad se pueden agrupar en tres grandes grupos:

a) *Productividad*: es un factor fundamental, pero visto desde el prisma de capacidad productiva en condiciones de cultivo más bien mediocres. Dados los suelos y climas en que la cebada se va a cultivar, es necesario que la variedad a sembrar sea capaz de dar buenas producciones en condiciones áridas y de fertilidad mediocre. Por tanto, un factor fundamental que deben presentar las variedades de cebada es buena rusticidad cuando vayan a cultivarse en seco. Indudablemente, las cebadas que sean para regadío deben presentar una alta capacidad productiva (Dendy *et* Dobraszczuk, 2004).

b) *Factores de regularidad de los rendimientos*: entre los más importantes se pueden citar,

* Precocidad: es muy importante prestar atención a este factor, aunque la cebada es muy precoz, pero se presentan diferencias sensibles entre variedades. Dentro de los límites lógicos, marcados por las fechas medias en que se presentan heladas tardías, es preferible cultivar la variedad que sea más precoz. La adecuada precocidad permitirá una mayor resistencia a la sequía.

* Encamado: en general, la cebada es más sensible al encamado que el trigo. Deberá prestarse especial atención a este carácter, ya que en tierras con suficiente fertilidad, en años lluviosos, el encamado puede producir disminución de la cosecha y favorecerá que se presenten problemas en la recolección.

* Resistencia al frío: en general, las cebadas de ciclo corto son sensibles al frío, aunque existen diferencias varietales. Al sembrarse al final del invierno en zonas frías, generalmente, pueden escaparse de este accidente.

* Resistencia a enfermedades y otros accidentes.

c) *Factores de calidad*: Generalmente, las cebadas de ciclo largo suelen emplearse para alimentación de ganado (pienso) aunque existen excepciones, mientras que las de ciclo corto, aunque no todas, se utilizan para maltería y producción de cerveza.

Para las cebadas de pienso las seis carreras (suelen ser las denominadas "cebada caballo") son de mejor calidad que las de dos carreras (cebada cervecera).

En las cebadas cerveceras son caracteres importantes: una gran regularidad en la germinación, bajo nivel de proteínas y alto poder diastásico.



En el cultivo de las variedades cuyo aprovechamiento sea la maltería es necesario efectuar correctamente un oportuno y equilibrado abonado nitrogenado, que permita obtener buenas producciones sin que el grano posea excesivo contenido en este elemento (Isla, 2004).

La cebada tiene siete cromosomas con más de cien genes que se encuentran localizados. La mejora genética se basa en obtener nuevas variedades que sean más productivas, con unos rendimientos más estables y de mejor calidad, pero el objetivo prioritario es el incremento del rendimiento en grano. Para lograrlo hay que actuar sobre la adaptación ecológica y la resistencia a plagas y enfermedades. La resistencia al encamado repercute directamente sobre el rendimiento a través de una mejor y mayor cantidad de granos por espigas.

El rendimiento en grano está correlacionado con la longitud del ciclo vegetativo, de ahí la diferencia de rendimiento entre las cebadas de invierno y las de primavera. La resistencia a plagas y enfermedades se considera un factor determinante en la estabilidad de los rendimientos del cultivo, al poder alterarlos cuando se dan las condiciones ambientales para el desarrollo del patógeno (Callejo, 2002).

En la cebada destinada para alimentación animal el criterio de calidad más importante, es el alto contenido de proteínas y bajo contenido en fibra. Existen programas de mejora genética en cuanto al incremento del contenido de lisina del grano. Muchas variedades actuales de cervecería están siendo empleadas en la alimentación animal, por su alto contenido de proteínas y carbohidratos solubles, y por la proporción relativamente baja de fibra que poseen.

Requiere un suelo bien labrado y blando, por ello va bien colocada en la rotación después de un barbecho. La tendencia actual, es la práctica del laboreo de conservación del suelo, utilizando para ello pequeños subsoladores o de arados chisel. Los ensayos de no laboreo, ponen de manifiesto la dificultad de disponer de sembradoras adecuadas para suelos pesados y en presencia de los restos del cultivo anterior.

Cuando la cebada se cultiva en regadío y, según el cultivo precedente, será distinta la labor de preparación. Si por tratarse de sembrar sobre rastrojo de maíz o incluso sobre un rastrojo anterior de cebada, etc., se considera conveniente labrar removiendo el terreno desde cierta profundidad, siempre teniendo muy en cuenta que a la cebada le va mal para su nacencia que se encuentre la tierra demasiado porosa o suelta.

Si por las razones que sean se ha realizado una labor de alza relativamente profunda, habrá que tratar de dejar el terreno más compactado o apelmazado. Esto se consigue con las gradas de discos pesadas, que, aunque aparentemente dejan el terreno muy fino y hueco, esto ocurre en algunos centímetros de la superficie, pero debajo de esta capa superficial, dado su elevado peso, más bien compactan.



En áreas con inviernos muy rigurosos se siembran cebadas de primavera, siendo la época de siembra desde el mes de enero hasta el mes de marzo. Cuanto más largo sea el ciclo de la variedad, la siembra será más temprana. Se recomienda adelantar la siembra en terrenos secos y sueltos, además la siembra temprana favorece la calidad de las cebadas cerveceras.

Las siembras tempranas tienen también algunos inconvenientes, entre ellos destaca: mayor incidencia de enfermedades y encamado e incremento de la población de malas hierbas. Por tanto, se recomienda sembrar lo antes posible, empleando variedades de invierno o alternativas (García et Dorronsoro, 2005).

La producción de las cebadas de invierno es más homogénea que las de primavera, y su exigencia en abonos minerales de estas últimas es menor, su sistema radicular está más desarrollado y aprovecha mejor todos los nutrientes del terreno. La cantidad de semilla depende del tipo de cebada (de invierno o de primavera). En la cebada de invierno sembrada a voleo se emplean de 150-180 kg/ha, y si se realiza en líneas esta cantidad disminuye de 120 a 125 kg/ha.

En las cebadas de primavera se emplea más cantidad de semilla, si las siembras son tardías deben ser más densa. Si la cebada se destina a forraje verde se emplea mayor cantidad de semilla. Las cebadas cerveceras se suelen sembrar en líneas, pues su maduración resulta más homogénea.

La cantidad de semilla a emplear es muy variable. Normalmente la cantidad empleada oscila entre 120 y 160 kg/ha. La siembra a chorrillo con sembradora, es el método más recomendable, hay un mayor ahorro de semilla, las poblaciones de plantas son más uniformes y hay una menor incidencia sectorial de enfermedades. Se suele realizar con distancias que varían algo entre líneas. Son corrientes las sembradoras fijas que guardan una distancia entre líneas de 17 o 18 cm.

La cebada tiene un coeficiente de transpiración de 319.13 (adimensional) superior al trigo (300.72), aunque, por ser el ciclo más corto, la cantidad de agua absorbida es algo inferior. La cebada tiene como ventaja que exige más agua al principio de su desarrollo que al final, por lo que es menos frecuente que en el trigo el riesgo de asurado (desequilibrio hídrico causado por una excesiva evapotranspiración en días de fuerte calor). De ahí que se diga que la cebada es más resistente a la sequía que el trigo, y de hecho así es, a pesar de tener un coeficiente de transpiración más elevado. En el riego de la cebada hay que tener en cuenta que éste favorece el encamado, a lo que la cebada es tan propensa. El riego debe hacerse en la época del encañado, pues una vez espigada se producen daños, a la par que favorece la propagación de la roya.

El ritmo de absorción de materias minerales en la cebada es muy elevado al comienzo de la fase vegetativa, disminuyendo después hasta llegar a anularse, habiéndose observado incluso, en algunos casos, excreciones radiculares de la vegetación (García et al., 2000).



-NITRÓGENO: la respuesta al nitrógeno puede variar con el periodo de crecimiento del cultivo, la variedad, el nitrógeno disponible en el suelo, que se relaciona con el nitrógeno residual del cultivo anterior y con las condiciones climáticas. Hay que tener en cuenta no hacer aportaciones excesivas de nitrógeno, ya que es muy sensible al encamado. También hay que considerar que en las cebadas cerveceras la mayor proporción de nitrógeno disminuye la calidad. Ocurre al contrario en la cebada destinada a la alimentación de ganado, cuya riqueza en proteínas es mayor cuando han sido mayores las aportaciones de nitrógeno en el abonado.

En los suelos ligeros conviene fraccionar la aplicación de nitrógeno para que sea utilizado con mayor eficiencia por la planta. También en las cebadas de invierno el nitrógeno debería aplicarse fraccionado entre otoño y primavera, con las dosis más bajas en otoño para disminuir las pérdidas por lixiviación durante el invierno.

Se recomiendan las aplicaciones tempranas, preferiblemente de nitrato amónico cálcico, desde la fase de tres hojas hasta mediados del ahijamiento. La cantidad debe ser igual a la añadida en fondo, de manera que no se superen las 70-80 UF/ha (Unidad de fertilizante por hectárea) en seco y las 100-120 en regadío o climas frescos.

-FÓSFORO: el fósforo es absorbido sobre todo al comienzo de la vegetación, estando su absorción ligada también a la del nitrógeno. Tiene una influencia decisiva sobre el rendimiento en grano de la cebada e incrementa su resistencia al frío invernal. La aplicación de fósforo en la línea de siembra, a dosis bajas, puede ser muy efectiva cuando existe poco fósforo disponible en el suelo, obteniéndose rendimientos equivalentes a dosis aplicadas a voleo dos o tres veces superiores. El fósforo no se lava, pero sí se retrograda en un buen porcentaje, pasando a formas no asimilables, siendo especialmente importante, la cebada suele sembrarse en terrenos calizos (Hettiarchchi *et* Pierzynski, 2002).

-POTASIO: el potasio aumenta la calidad cervecera y la resistencia al encamado. La cebada extrae de los suelos en general los elementos nutritivos (NPK), por hectárea y por tonelada producida; esto es de 26 kg de N, 20-21 kg de P como P_2O_5 y 25 kg de K como K_2O . Teniendo esto en cuenta, para una producción de 2.5 t/ha, un abonado recomendable sería 75 kg de N, 75 kg de P_2O_5 y 75 kg de K_2O .

Todo este abonado puede ponerse en fondo y si parte del nitrógeno se incorpora en cobertera, este abonado nitrogenado de cobertera debe hacerse temprano por dos razones: la primera, porque la cebada tiene mayor necesidad de los elementos nutritivos en la primera parte de su desarrollo; la segunda, porque el nitrógeno tardío favorece el encamado.

Según García y Dorronsoro (García *et* Dorronsoro, 2005) la aplicación de azufre por vía foliar durante el ahijado mejora la utilización de los recursos hídricos del suelo por la cebada e incrementa el número de espigas/planta. Su efecto se



asemeja al de un regulador del crecimiento que estimula el ahijamiento, suplementando la acción del nitrógeno o ejerciendo un efecto aditivo sobre la dosis del mismo.

La presencia de malas hierbas depende en gran medida del laboreo precedente a la siembra de la cebada. El barbecho de verano, en áreas semiáridas, al igual que el laboreo con vertedera junto a la aplicación de herbicidas, proporciona un control efectivo de las malas hierbas. El empleo de herbicidas debe integrarse con las prácticas culturales, que proporcionan un control integrado de las malas hierbas, teniendo en cuenta que la cebada es un cultivo de bajos costes de producción y que el empleo de ciertos tratamientos herbicidas, aconsejables en el trigo, pueden no ser conveniente en la cebada desde el punto de vista económico.

Si se realiza la recolección mediante cosechadora autopropulsada de cereales, el grano ha de estar bien seco (con un contenido de humedad menor del 12%). Conviene regular perfectamente la cosechadora, para evitar romper, pelar o dañar el embrión de los granos, sobre todo cuando se trata de cultivos para producción de semilla o cebadas cerveceras, ya que en ambos casos el grano recogido habrá de germinar posteriormente.

Los dos problemas principales conocidos como fisiopatías o daños en el cultivo, que pueden presentarse durante el proceso de cosecha de la cebada son el encamado y la rotura del cuello de la espiga, lo cual suele ocurrir ya en las etapas finales del desarrollo del cultivo. Esto es un problema fundamental que atenta contra los rendimientos.

El encamado se produce cuando la planta, una vez espigada, se tumba al doblarse los tallos por la parte inferior. El uso de variedades con tallo recio y corto evita este accidente; aunque la aplicación de elevadas dosis de potasio y nitrógeno y fuertes precipitaciones puede hacer que ninguna variedad sea resistente. Los efectos del encamado sobre el rendimiento y calidad del grano pueden ser muy importantes.

Por su parte la rotura del cuello de la espiga tiene lugar durante la fase de llenado del grano o después de la madurez fisiológica; pueden tener gran incidencia en la disminución de la capacidad productiva del cultivo. Aunque suele tener un origen genético, la rotura del cuello con caída de la espiga una vez que la planta está seca, suele proceder del retraso excesivo en la cosecha.

III.4. Presencia de metales en los cultivos.

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento (movilidad de las especies) de los metales desde la solución en el suelo a la raíz de la planta. Posteriormente se presenta el paso de los metales en estado ionizado o disuelto a través de las membranas corticales de la raíz; la transportación de dichos metales desde las células corticales al xilema, permite el paso de la raíz al tallo. También



se presenta la posible movilización de los metales desde las hojas hacia los tejidos de almacenamiento usados como alimento (semillas o granos, tubérculos y frutos) por el floema. Después de la absorción por los vegetales, los metales están disponibles para los herbívoros y humanos directamente o a través de la cadena alimentaria (García *et al.*, 2000).

El concepto de bioacumulación se refiere a la acumulación de contaminantes en los organismos y el índice de bioacumulación (IBA) se expresa por la relación entre la cantidad de un contaminante en un organismo vivo y la concentración de ese contaminante en el suelo. Algunos elementos son más susceptibles a ser fitodisponibles (disponibles por la planta) que otros (Kabata-Pendias, 2000). En la figura III.3 se observa un criterio propuesto por Kabata-Pendias, donde se muestra el IBA de diversos metales en plantas verdes y hongos. En esta representación no se indica en que tipo o variedades de cultivos se trabajó, sólo se limita a señalar los IBA y el grado de acumulación tanto para plantas verdes como para hongos. En el presente trabajo se evaluarán los IBA para el cultivo de cebada. En la figura III.3. el IBA fue calculado como la relación de elementos traza contenidos en plantas y hongos, respecto a la concentración en los suelos.

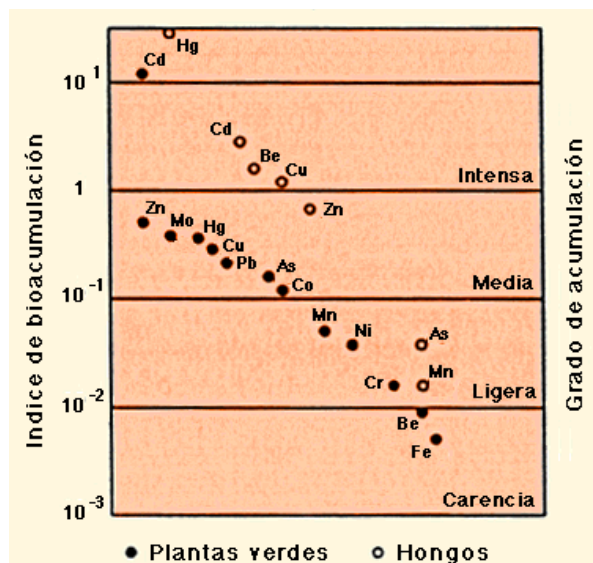


Figura III.3. Índices de bioacumulación (IBA) de diversos elementos traza en plantas verdes y hongos (Kabata-Pendias, 2000).

Otro mecanismo de ingreso de sustancias potencialmente tóxicas a las plantas, como los metales pesados, es mediante la absorción foliar. La disponibilidad a través de las hojas de algunos elementos traza provenientes de fuentes aéreas (por ejemplo, plomo en el aire), puede tener un impacto significativo en la contaminación de las plantas y también es de particular importancia, en la aplicación de fertilizantes foliares (por ejemplo presencia de níquel). La absorción foliar es mediada por una fase de penetración cuticular y un mecanismos de carácter metabólico que considera la acumulación de los elementos, contra un gradiente de concentración (Kabata-Pendias, 2000).



Los elementos traza son aquellos que se encuentran en baja concentración en el suelo o en las plantas. La vegetación ejerce un importante papel en el ciclo de los microelementos y en la contaminación de la cadena alimenticia. Las plantas pueden acumular elementos, especialmente trazas de elementos tóxicos o peligrosos que pueden ser transferidos al hombre o a los animales.

Existen factores, además de la textura del suelo, que afectan la capacidad de las plantas para acumular elementos metálicos; factores tales como: la especie vegetal (unas especies son muy sensibles mientras que otras son muy tolerantes), el órgano de la planta, (generalmente los granos suelen contener concentraciones menores de elementos metálicos que otros órganos vegetales) y las prácticas agrícolas, como la aplicación de fertilizantes o riego con agua residual (Abollino *et al.*, 2002).

La absorción de elementos tóxicos por plantas depende no sólo del contenido total en el suelo sino de la forma química en que se encuentren. Entre las distintas formas que los metales pueden adoptar en suelos, la forma soluble en agua y la iónica son las únicas que caracterizan las especies móviles de metales y tienen la posibilidad de ser transferidas a las plantas (Kabata-Pendias, 2000).

En la corteza terrestre están presentes varios elementos traza tóxicos como lo son el cadmio, cromo y plomo, entre otros. Estos elementos suelen ser absorbidos por las plantas en bajas concentraciones, aunque depende de la concentración en la que se encuentren en el suelo y de otras fuentes de contaminación cercanas a los cultivos. El cadmio, cromo y plomo son analizados en alimentos por ser tóxicos y producir efectos dañinos a la salud humana y animal, desde una simple intoxicación hasta producir la muerte (Prieto *et al.*, 2007a).

Se ha reportado que en los granos de cebadas producidas en los estados de Hidalgo y Tlaxcala contienen elementos traza tóxicos (López *et al.*, 2005). Entre las variedades de cebadas analizadas por estos autores, se reportan, para el estado de Hidalgo (Esmeralda 1, Esmeralda 2, Pastor Ortiz, M16) y para el estado de Tlaxcala (Esmeralda, Forrajera y M16) los resultados obtenidos del análisis de minerales en dichas variedades de cebada las cuales se muestran en la tabla III.6.

Tabla III.6. Minerales (mg/100g) presentes en granos de las diferentes variedades de cebada (desviación estándar) (López *et al.*, 2005)

VARIEDAD	Ca	Fe	Na	Mg	K
Esmeralda 1H	80.4 (0.2) ^C	0.3 (0.02) ^B	0.8 (0.06) ^B	10.0 (0.07) ^D	12.8 (0.13) ^C
M16H	16.5 (0.3) ^B	0.2 (0.01) ^B	0.7 (0.05) ^B	3.5 (0.03) ^B	17.5 (0.14) ^A
Pastor Ortiz H	8.5 (0.2) ^A	0.4 (0.06) ^C	3.3 (0.09) ^C	0.9 (0.09) ^A	11.7 (0.15) ^D
Esmeralda 2H	87.7 (0.1) ^D	0.1 (0.04) ^A	0.4 (0.04) ^A	5.4 (0.1) ^C	12.1 (0.13) ^B
Esmeralda T	183 (0.1) ^F	13.0 (0.09) ^E	118 (0.07) ^D	538 (0.06) ^G	1065 (0.07) ^F
M16T	126 (0.1) ^E	11.2 (0.02) ^D	152 (0.04) ^F	399 (0.02) ^E	1033 (0.03) ^E
Forrajera T	200 (0.1) ^G	20.9 (0.09) ^G	135 (0.06) ^E	514 (0.11) ^F	1372 (0.10) ^G

*Letra diferente dentro de la columna indica diferencias significativas estadísticas.
H = Hidalgo
T = Tlaxcala



En general, todas las variedades son ricas en contenido de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K). En el contenido de hierro (Fe) y sodio (Na) son relativamente más bajas. Con relación a zinc (Zn), cadmio (Cd) y cromo (Cr), en el conjunto de las variedades no hubo contenido suficiente, ya que resultó menor al límite de detección (LD). Sin embargo algunas variedades presentaron contenido de plomo (Pb). Este último elemento es considerado como elemento traza tóxico y peligroso tanto para humanos como para animales dependiendo de la concentración en la que se encuentren (AAFCO, 1996).

En esta investigación se encontró plomo en la variedad Esmeralda, en sus genotipos Esmeralda 1, Esmeralda 2 y Esmeralda Tlaxcala. Esta semejanza entre los tres genotipos es la razón por la que los autores afirman, que está asociada al sitio de cultivo o a las aguas de riego.

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y la Comisión del Codex Alimentarius fijan como límite máximo 50 µg de plomo/100g en general para alimentos (FAO/OMS, 2001) y el límite máximo que marca la Unión Europea en granos de cereales es de 20 µg de plomo /100 g (<http://www.mcx.es/plaguicidas/matalpesaUE.asp>). Los tres genotipos de la variedad Esmeralda sobrepasan el límite máximo de plomo. La concentración de plomo en esta variedad sobrepasa de 2 a 8 veces el valor máximo permitido por las NOM y son superiores al límite máximo permitido por la Unión Europea de 5 a 20 veces.

Sin embargo, la ingesta diaria tolerable de plomo en humanos es de 0.24 mg/día (Méndez, 2004), por lo tanto Esmeralda 1 y Esmeralda 2 pueden ser utilizadas para consumo humano. La variedad Esmeralda Tlaxcala es rechazada por estos autores, ya que casi contiene lo doble de plomo que se tolera para que ingieran los humanos. Sin embargo, si alguna de las tres variedades fue consumida por humanos no representa riesgo de intoxicación crónica, ya que la dosis necesaria para presentar síntomas debe ser de 0.5 mg/día o mayor y en una exposición continua. La dosis letal de plomo absorbida es de 0.5 g para adultos (Prieto *et al.*, 2007b).

El plomo se acumula más en huesos que en tejidos blandos; por esta razón, los aportes de plomo en las carnes a la dieta humana son muy bajos (Prieto *et al.*, 2007b). Así que tampoco representa riesgo para los humanos que hayan consumido carne de animales que se alimentaron de esta cebada.

III.4.1. Manganeso en los cultivos.

El manganeso (Mn) es un elemento muy común en la corteza terrestre, generalmente se presenta en el suelo como óxido e hidróxido, formando concreciones junto con otros elementos metálicos. El Mn es esencial en la nutrición de las plantas, es requerido en el fotosistema y activación de algunas enzimas (Mahler, 2003). Aparentemente la absorción de Mn es mediante transporte activo y se produce de manera similar a la absorción de otros cationes divalentes como el Mg^{2+} y Ca^{2+} . Sin embargo, cuando el metal se encuentra en



alta concentración en la solución del suelo puede ocurrir una absorción pasiva (Kabata-Pendias, 2000). Cuando la disponibilidad del Mn es elevada en el suelo (por ejemplo en suelos mal drenados y de pH menores de 5.5 o mayores de 8.0), éste es rápidamente traslocado dentro de las plantas o otros órganos, por lo que es probable que en los tejidos celulares de la raíz y el xilema no se encuentre ligado a moléculas orgánicas insolubles, sino más bien en formas catiónicas libres y siendo movilizado principalmente hacia tejidos meristemáticos.

III.4.2. Níquel en los cultivos.

El níquel (Ni) es también un elemento esencial para el metabolismo de las plantas, aun cuando éstas requieren menos de 0.001 mg kg^{-1} de peso seco (Mahler, 2003). En la corteza terrestre existe una similitud entre la distribución de Ni, cobalto (Co) y hierro (Fe). El Ni presenta afinidad por tanto, con el Fe y también el azufre (S), pero a la vez con carbonatos, fosfatos, silicatos y óxidos de Fe y Mn, por ello suele estar presente como impureza en los fertilizantes fosfatados y en ocasiones en los nitrogenados. En los horizontes superficiales del suelos (capas arables), el Ni aparece ligado a formas orgánicas, parte de las cuales pueden encontrarse formando quelatos fácilmente solubles. Sin embargo la fracción más soluble a las plantas parece ser la asociada a los óxidos de Fe y Mn. Generalmente, la solubilidad del Ni se encuentra inversamente relacionada con el pH del suelo. Varía su concentración en los suelos entre 0.2 y 450 mg kg^{-1} , pero los valores típicos más generales se encuentran entre 5 y 22 mg kg^{-1} . El Ni siendo un elemento móvil en los tejidos de las plantas, se acumulan preferiblemente en las hojas y en las semillas (Moral *et al.*, 1994).

III.4.3. Cobre en los cultivos.

En el suelo los iones de cobre (Cu) presentan una alta afinidad para formar complejos con la materia orgánica (MO). De esta forma, es frecuente que la MO del suelo sea el factor más importante en determinar la biodisponibilidad del Cu (Castillo *et al.*, 1993). En el rango de pH entre 4.5 y 7.0 se presenta la mayor disponibilidad del Cu en el suelo. Los mecanismos de absorción del Cu por las plantas aún no están totalmente descritos y se ha señalado una probable absorción pasiva, sobre todo cuando la concentración de la solución en que crecen las plantas está en el rango de toxicidad del metal, aunque también existen evidencias de absorción activa (Kabata-Pendias, 2000). En los tejidos de la raíz se acumula en forma de complejos, pero es muy probable que entre a éstas en forma disociada. Se ha observado una alta capacidad de los tejidos de las raíces para almacenar Cu. En la sabia xilemática de las plantas el Cu se encuentra en su casi totalidad ligado a aminoácidos (Liao *et al.*, 2006; Liao *et al.*, 2001a; Liao *et al.*, 2001b). Esto sugiere que aún bajo condiciones de toxicidad de Cu, las plantas son capaces de acomplejarlo, minimizando el daño potencial a altas concentraciones de iones libres (Welch, 1995).

El Cu tiene una movilidad relativamente baja respecto a otros elementos en las plantas, permaneciendo en los tejidos de las raíces fundamentalmente y en las



hojas hasta su senescencia. Por ello es que en los órganos jóvenes son los primeros en desarrollar deficiencia de Cu. Las mayores concentraciones de Cu en órganos reproductores se han encontrado en el embrión y la cubierta seminal de los granos de cereales. Pérez *et al.* (2004) señalan que la relación (metal en grano y en hoja)/(metal cambiante en el suelo) decrece en el orden de Zn>Cu>Pb>Cd, siendo los valores más altos para las hojas, que para los granos.

III.4.4. Zinc en los cultivos.

El Zinc (Zn) es también un elemento esencial para las plantas, que participa en varios procesos metabólicos y es un componente de varias enzimas. El contenido medio de Zn en la superficie de los suelos de diferentes países varía de 17 a 125 mg kg⁻¹. La absorción y desorción de Zn en el suelo se encuentra vinculada a los coloides orgánicos e inorgánicos. Existen dos mecanismos en la adsorción de Zn, uno en medio ácido relacionado con los sitios de intercambio catiónico y otro, en medio alcalino asociado con la quimiosorción que es influenciada por ligandos orgánicos. La movilización y lixiviación de Zn es mayor en suelos ligeramente ácidos al aumentar la competencia con otros cationes por los sitios de intercambio. Por otra parte la solubilidad y disponibilidad del Zn se correlaciona negativamente con la saturación de calcio (Ca) y compuestos fosforados que estén presentes en los suelos. El mecanismo mediante el cual el Zn es absorbido por las raíces no ha sido del todo definido con precisión; sin embargo se conoce que ingresa a los tejidos como Zn²⁺ aún cuando puede estar absorbido como complejo y quelatos orgánicos (Pearson *et al.*, 1996).

III.4.5. Molibdeno en los cultivos.

El contenido de Molibdeno (Mo) en los suelos generalmente se encuentra asociado al material parental y las rocas, variando entre 0.013 y 17 mg kg⁻¹. Se encuentra asociado principalmente a rocas félsicas como el granito. El Mo es más soluble en suelos alcalinos, asociándose principalmente a compuestos orgánicos e hidróxidos de hierro. Es un micronutriente esencial para las plantas, aún cuando su requerimiento fisiológico es relativamente bajo. Se encuentra presente en ácidos nucleicos y forma parte de algunas enzimas como la nitrogenasa y la nitroreductasa, presentándose en forma más abundante en los nódulos de las raíces de las planta leguminosas. Las concentraciones óptimas de Mo en trébol subterráneo, por ejemplo, se encuentran en el rango de 0.5 a 1.0 mg kg⁻¹ y nunca sobrepasan los 5.0 mg kg⁻¹, considerándose este valor como excesivo (Opazo *et al.*, 2000).

III.4.6. Cadmio en los cultivos.

El Cadmio (Cd) es un elemento de naturaleza química muy similar al Zn, ambos pertenecen al Grupo IIB de la Tabla Periódica y es sustituto de éste en forma de impureza en los minerales de Zn. Por esto el Cd es un subproducto de las funciones del Zn y otros metales. También se presenta como sustituto del Calcio (Ca) en la apatita y en la calcita, pudiendo aumentar sus impurezas en los



fertilizantes fosfatados. El hecho de que el Cd sea un metal pesado y tóxico, sin funciones metabólicas y el Zn sea un elemento esencial para la nutrición y participa en funciones del metabolismo vegetal y animal, hace que de esta asociación puedan prevenir los posibles efectos tóxicos del Cd mediante un tratamiento preventivo con Zn (Das *et al.*, 1998). El Cd es uno de los metales trazas en el suelo más soluble (García *et al.*, 2000) y peligrosos, debido a su alta movilidad iónica y que pequeñas concentraciones tiene efectos nocivos en las plantas. Es soluble en estados oxidados y bajo condiciones de reducción precipita, generalmente como sulfuro de cadmio (CdS). Esta es la razón por la cual en cultivos de arroz, los contenidos de Cd pueden ser mayores si son cultivados en condiciones de anegación. Aunque el arroz se cultiva generalmente en suelos mal drenados, no ha sido demostrada una relación directa entre la concentración de Cd en los suelos y el arroz cosechado (Chen, 2000).

La concentración de Cd en cereales, tubérculos y verduras, no es alta al compararla con la que hay en otros productos alimenticios como las semillas de linaza, riñones e hígados de mamíferos y en mariscos (Jorhem *et Sundström*, 1993). Sin embargo los consumos de cereales, tubérculos y verduras son elevados por lo cual estas fuentes son consideradas como importantes; es por ello que la FAO y la OMS (desde 1998) han sugerido como valor límite permisible de Cd en cereales y leguminosas de granos en 0.1 mg kg^{-1} (FAO, 2001). En plantas los síntomas más generales de intoxicación por Cd son la atrofia y la clorosis. Esta últimas puede aparecer debido a una interacción directa o indirecta con el Fe, el Zn, el fósforo de los fertilizantes y el Mn. Altos contenidos de Cd en el medio de crecimiento inhiben la absorción de Fe en los cultivos. En general el Cd interfiere en los mecanismos de transportación de otros elementos esenciales como el Ca, Mg, P y K (Das *et al.*, 1998).

III.4.7. Plomo en los cultivos.

El Plomo (Pb) es un elemento que varía en los horizontes superficiales del suelo (capas arables) en un rango entre 3 y 190 mg kg^{-1} , siendo los valores medios para suelos oscilan entre 10 y 65 mg kg^{-1} siendo en promedio típico alrededor de 32 mg kg^{-1} . La solubilidad del Pb se puede disminuir mediante el encalado, ya que en condiciones alcalinas el Pb precipita como hidróxidos, fosfatos o carbonatos y también se promueve la formación de complejos orgánicos estables. La acidez creciente de los suelos facilita su solubilidad pero su movilización es más lenta que su acumulación en las capas de suelos ricas en materia orgánica y esto está relacionado con la acumulación superficial de la materia orgánica. En los suelos contaminados con Pb se suele encontrar Cd y Zn (Hettiarchchi *et Pierzynski*, 2002). La barrera suelo-planta limita la traslocación de Pb a la cadena alimenticia, ya sea por procesos de inmovilización química en el suelo (Laperche *et al.*, 1997) o limitando el crecimiento de la planta antes de que el Pb absorbido alcance valores que puedan ser dañinos al ser humano. Sin embargo la absorción y la traslocación de Pb por deposición atmosférica en las hojas y otros órganos de los cultivos, puede llegar a ser entre un 73 y un 95% del contenidos de Pb total en hojas y en cereales (Kabata-Pendias, 2000). El Pb presente en suelos



contaminados puede llegar a estabilizarse mediante la aplicación de fósforo y óxidos de magnesio; sin embargo estos tratamientos pueden llegar a afectar la biodisponibilidad de otros metales esenciales como el Zn (Hettiarchchi *et* Pierzynski, 2002). En las plantas el Pb se acumula principalmente en las raíces siendo mínima su presencia en otras partes u órganos de los cultivos.

De una manera general se muestran en la tabla III.7 algunos datos reportados sobre los contenidos de estos metales en granos de cebada en rangos promedios.

Tabla III.7. *Contenidos de algunos metales reportados en granos de cebada (Kabata-Pendias, 2000), calculados en base seca.*

Elemento	Rango (peso seco)	Valores medios
Mn	12-30 mg kg ⁻¹	20 mg kg ⁻¹
Ni	0.10-0.67 mg kg ⁻¹	0.35 mg kg ⁻¹
Cu	1.8-9.2 mg kg ⁻¹	4.12 mg kg ⁻¹
Zn	16-51 mg kg ⁻¹	32 mg kg ⁻¹
Mo	0.02-2.40 mg kg ⁻¹	1.00 mg kg ⁻¹
Cd	0.002-0.076 mg kg ⁻¹	0.019 mg kg ⁻¹ (*)
Pb	0.10-1.50 mg kg ⁻¹	0.50 mg kg ⁻¹

(*) Este valor se reporta en Suecia y en Reino Unido y es de 2 a 3 veces inferior a lo reportado para el grano de trigo

III.5. Fitotoxicidad por presencia de metales.

El término fitotoxicidad se ha asociado con la acumulación de una sustancia tóxica o dañina en el tejido de una planta en niveles que afectan su crecimiento y normal desarrollo. Desde el punto de vista biológico, los agentes tóxicos pueden clasificarse según el órgano blanco, el uso, la fuente o el efecto que produzcan sobre los tejidos de las plantas. Desde el punto de vista químico se clasifican según su estado físico, su propiedad o propiedades peligrosas, su grupo químico y su potencial como tóxico, agudo. También se clasifican según sea el origen de la exposición humana, por ejemplo, contaminante del aire, agente de riesgo laboral y aditivos alimentarios (Malagón, 2007). Entre estas clasificaciones aparecen los metales.

Sin embargo, estas definiciones muchas veces no son adecuadas porque las plantas presentan distintos grados de fitotoxicidad mostrando una gran variedad de síntomas durante su ciclo de crecimiento, existiendo distintos niveles de daños. Los tóxicos pueden presentar efectos que se desarrollen rápidamente (inmediatos) o pueden presentarse más tarde (retardados). Del mismo modo, pueden alterar tejidos (efectos irreversibles), o este último puede regenerarse después de la exposición (reversibles). También es importante diferenciar las sustancias que causan efectos en el sitio del primer contacto entre el agente tóxico y el organismo (efecto local), como es el caso de las sustancias tóxicas o irritantes y las sustancias que se distribuyen a través del organismo (efecto sistémico), causando el daño en zonas distantes al lugar de exposición (Malagón, 2007).

Además, el crecimiento no sólo se ve afectado por la acumulación de sustancias tóxicas, sino que también por factores medioambientales como pueden ser deficiencias nutricionales, estrés hídrico, daños en raíces u otros, los cuales producen disminución en los rendimientos y afectaciones a la calidad en general del



producto (Naidu *et al.*, 2006). Indican que para confirmar que existe fitotoxicidad por metales se requiere que:

- Las plantas sufran un daño.
- El metal potencialmente tóxico sea acumulado en el tejido vegetal.
- Las anomalías observadas no corresponden a otros desórdenes del crecimiento de la planta o a las afectaciones por otros tipos de agentes contaminantes o xenobióticos.
- Se observen los mecanismos bioquímicos que causan la toxicidad del metal en las plantas durante el ciclo de crecimiento.

En general las plantas son mucho más resistentes a los incrementos en la concentración que a una insuficiencia de un elemento esencial dado. Es distinto el caso cuando se trata de un elemento no esencial, donde el nivel de daño aumenta conforme lo hace la concentración del elemento, como se ilustra en la figura III.4.

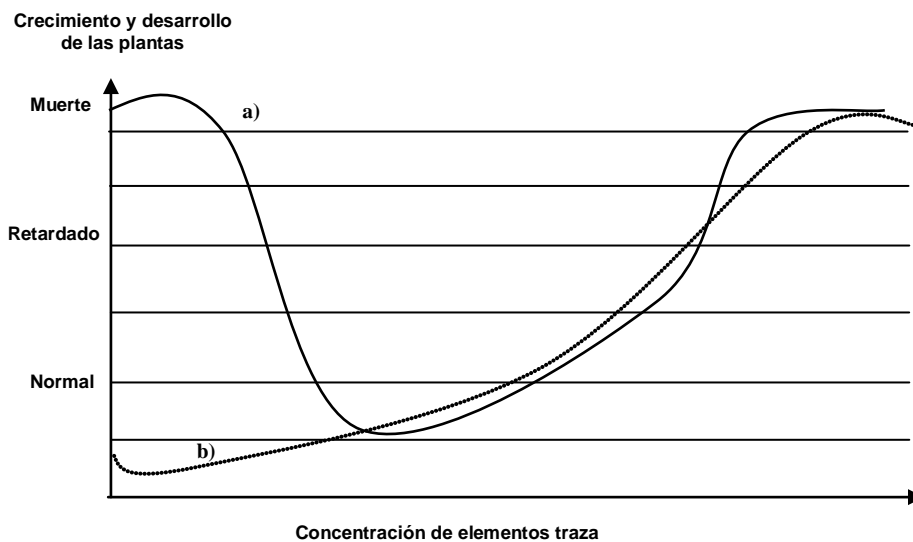


Figura III.4. Respuesta de las plantas al estrés por deficiencia y toxicidad de elementos traza. a) Elementos traza esenciales, b) Elementos traza no esenciales (Kabata-Pendias, 2000)

En general se puede establecer que los metales más tóxicos tanto para plantas superiores como para ciertos microorganismos son el Hg, Cu, Ni, Co, Cd y posiblemente también Ag, Be y Sn (Kabata-Pendias, 2000; Prieto *et al.*, 2009).

En la tabla III.8 se muestran los valores que se reportan como rangos de concentraciones para los elementos que en este estudio se evalúan (Pb y Ni) en hojas maduras de varias especies (Kabata-Pendias, 2000). Aun cuando los rangos mostrados corresponden a aproximaciones generales, es importante hacer notar que los rangos de suficiencia y toxicidad se encuentran muy cercanos, haciendo difícil establecer o marcar una clara división entre ambos.



Tabla III.8. Concentraciones de Cd, Mn, Ni y Pb para varias especies de tejidos de hojas maduras (Kabata-Pendias, 2000).

Elemento	Concentración (mg kg ⁻¹) base seca		
	Suficiente o normal	Excesiva o tóxica	Tolerable en cultivos agrícolas
Cd	0.002-0.020	0.20-5.00	0.05-0.10
Mn	10-30	100-500	15-50
Ni	0.1-5.0	30-300	0.5-10.0
Pb	5.0-10.0	10-100	1.0-10.0

Nota: Los valores no incluyen a especies muy sensibles o tolerantes

III.6. Clasificación de los cultivos con relación al riesgo alimentario

Han sido propuesto tres patrones que relacionan la biodisponibilidad de los nutrientes y su absorción en los cultivos (Chen, 2000). En el patrón de tipo I, la absorción incrementa con el crecimiento del cultivo para luego decaer cuando el cultivo alcanza su madurez (figura III.5.a). Este patrón se cumple en el proceso de absorción de la mayoría de los macronutrientes esenciales como el nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). El patrón de tipo II es similar al primero (tipo I) pero presenta un pico más pronunciado y se asocia generalmente con la absorción de oligoelementos esenciales como el cobre y el zinc (figura III.5.b). El patrón tipo III, presenta una absorción elevada en las primeras etapas del desarrollo y cae durante las siguientes etapas; este es el patrón observado para metales pesados tóxicos y metaloides como el cromo, cadmio, plomo, níquel, mercurio y arsénico (figura III.5.c). La Unión Europea ha establecido normativas muy estrictas para los contenidos de metales tóxicos en algunos alimentos.

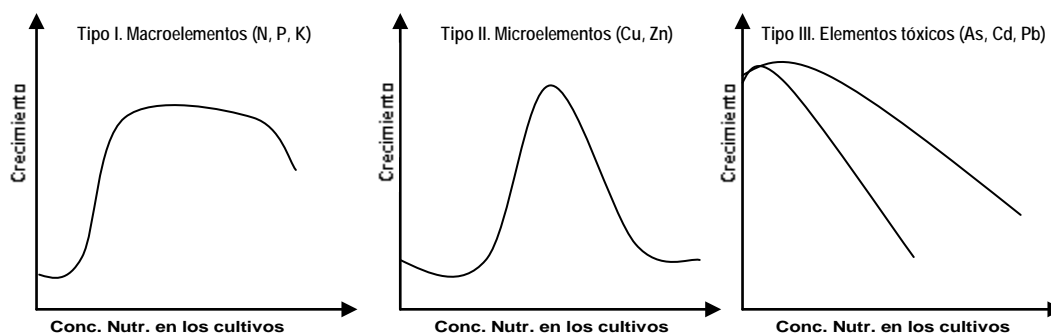


Figura III.5. Patrones de crecimiento o rendimiento en función de la concentración de nutrientes y elementos tóxicos en cultivos (Tomado con modificaciones de Chen, 2000).

A) Patrón tipo I, B) Patrón tipo II y C) Patrón tipo III.

En la tabla III.9 se muestran los valores máximos permitidos por los países de la Unión Europea para contenidos de Pb, Cd y Hg en algunos tipos de alimentos.

Los cultivos se pueden clasificar según el riesgo alimentario en relación a cada metal, como inocuo, susceptible y peligroso, dependiendo en primer lugar si se encuentran cultivados en suelos con alta biodisponibilidad del elemento y si son ingeridos directa o indirectamente por el ser humano. Existen tres situaciones a saber:



- Los cultivos no presentan toxicidad ni son bioacumulados de elementos traza, potencialmente dañinos al ser humano.
- El cultivo presenta toxicidad por metales pesados, alterando su rendimiento, entonces se debería restringir el consumo de aquellos alimentos afectados con elementos que no son esenciales al hombre como As, Cd, Hg y Pb.
- El suelo tiene o presenta elevadas cantidades de metal disponible, pero permite el desarrollo y cosecha de un cultivo. En este caso se debe definir el riesgo alimentario del cultivo en relación al destino que pueda tener en la industria alimentaria, considerando qué órgano de la planta será procesado o consumido directamente. Los cultivos cuyos productos son utilizados en la industria, como la madera de las plantaciones forestales y las fibras naturales, no revisten un riesgo directo para la salud humana y pueden considerarse inocuos, independientemente del contenido de metal presente en sus tejidos.

Tabla III.9. Contenidos máximos permitidos en Pb, Cd y Hg en algunos alimentos, según la Unión Europea (mg kg^{-1}), en base de peso seco (Méndez, 2004).

Alimento	Pb
Cereales, legumbres y leguminosas	0.20
Vegetales	0.10
Vegetales de hojas y hongos	0.30
Frutas	0.10
Alimento	Cd
Cereales	0.10
Soya	0.20
Vegetales y frutas	0.05
Vegetales de hojas y hongos	0.20
Vegetales de raíz y tubérculos	0.10
Alimento	Hg
Pescados y mariscos en general	0.50

Valores similares para Cd y Pb en cereales (0.20 y 0.50 mg kg^{-1} , respectivamente) han sido establecidos en Chile y otros países de América Latina, como Argentina (Charley, 2000; Callejo, 2002).

Debido a que la finalidad última de cualquier normativa o recomendación es la protección de la salud del hombre, se deben tener presente tres factores esenciales en la cadena suelo-planta-hombre, y que son:

1. Adsorción del elemento en el suelo (grado de disponibilidad).
2. Fitotoxicidad.
3. Riesgo en la cadena alimentaria.

Basándose en estos factores se han formado cuatro grupos de metales y metaloides según la biodisponibilidad y riesgo potencial (Kabata-Pendias *et* Pendias, 2000), los que se indican en la tabla III.10.



III.7. Cebada calidad no maltera. Otras potencialidades.

La cebada maltera se vende a un precio promedio que oscila entre \$2,000.00 y \$2,500.00 por tonelada, en tanto que la cebada que no cumple esta calidad es rechazada y es utilizada y vendida para forrajes de animales a un precio de \$400.00 por tonelada, lo que representa una gran pérdida económica para los productores. El incorporar un nuevo valor agregado a estas producciones sería una alternativa de producción.

Tabla III.10. Grupo de metales y metaloides según biodisponibilidad y riesgo para la cadena alimentaria (Kabata-Pendias et Pendias, 2000).

Grupo	Metal	Adsorción en el suelo	Fitotoxicidad	Riesgo para la cadena alimentaria
1	Ag, Cr, Sn, Ti, Y y Zr	Baja solubilidad y fuerte retención en el suelo	Baja	Bajo riesgo porque estos elementos son tomados en menor grado por las plantas
2	As, Hg y Pb	Adsorbidos fuertemente por los coloides del suelo	Las plantas pueden absorberlos pero no traslocarlos hacia los tallos o generalmente no son fitotóxicos excepto a concentraciones muy altas	Causa mínimos riesgos para la cadena alimentaria humana
3	B, Cu, Mn, Mo, Ni y Zn	Menos fuertemente adsorbidos al suelo comparado con los grupos 1 y 2	Fácilmente tomados por las plantas, son fitotóxicos a concentraciones que causan bajo riesgo a la salud humana	Conceptualmente la barrera suelo-planta protege en parte a la cadena alimentaria de estos elementos
4	Cd, Co y Se	Menor grado de adsorción al suelo en relación a los otros metales	Causan riesgos en la salud humana o animal a concentraciones en el tejido de la planta que generalmente no son fitotóxicas	Existe bioacumulación a través de la cadena alimentaria suelo-planta-animal

Siendo la cebada extremadamente rica en carbohidratos, y dentro de éstos los elevados contenidos de almidones, se lograría un nuevo bioproducto a obtener del cultivo de cebada. Se tendría por la extracción y comercialización de los almidones de variedades de cebadas, así como sus tecnologías de modificaciones y usos en productos alimenticios, otras alternativas y usos potenciales, lo cual podría generar nuevas fuentes de empleo y redundar en elevadas ganancias, competitivas con los almidones tradicionales.

III.8. Bibliografía

- AAFCO. (1996). Association of American Feed Control Officials. Official Publication. pp. 230.
- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentaste, E., Sarzanini, C. y Barberis, R. (2002). Distribution and Mobility of Metals in Contaminated Sites. Chemometric Investigation of Pollutant Profiles. Environmental Pollution, 119, p. 177.
- Agricultural Research Service US Department of Agriculture. (1988). Barley: Origin, botany, culture, winterhardiness, genetics, utilization, pests. Agriculture handbook N° 338. Agricultural Research Service, US



- Department of Agriculture, Washington, D.C., EUA. pp. 127. USDA Agricultural Research Service, www.ars-grin.gov/npgs/tax., (2007).
- Aguilar, J. y Schwentesius, R. (2004). La Producción de Cebada Maltera en México. Ventaja Comparativa no Capitalizada. Reporte de Investigación Núm. 72. Universidad Autónoma Chapingo, México, p.61.
 - Callejo M. de J. (2002). Industria de cereales y derivados. Editorial AMV Ediciones y Mundi-Prensa. 1ª. Edición, Cap. 14 p.313-325.
 - Castillo, A.; López, M.; Pulido, A. (1993). Some Spanish Karstic Aquifers, p. 117-126.
 - Charley H. (2000). Tecnología de alimentos. Procesos químicos y físicos en la preparación de alimentos. Editorial Limusa Noriega Editores, p. 189-197.
 - Chen, Z. S. (2000). Relationship between heavy metal concentrations in soils of Taiwán and uptake by crops. On line in: <http://www.fftc.agnet.org/library/article/tb149.html>. Food and fertilizer technology center.
 - Das, P.; Smantaray, S.; Rout, G. R. (1998). Studies on cadmium toxicity in plants: A review. Environmental Pollution, 98:29-36.
 - Dendy D. A. y Dobraszczuk, B. J. (2004). Cereales y productos derivados. Química y tecnología. Editorial Acribia, S. A. pp. 87-107; 127-130; 341-358; 380-382; 389-394.
 - FAO/OMS (2001). Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias. Comisión del Codex Alimentarius. ALINORM 01/14, 2-7 de Julio, 24º Periodo de sesiones. Ginebra. pp. 2.
 - García, I., Dorronsoro, C. (2005). Contaminación por Metales Pesados. En Tecnología de Suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. <http://edafologia.ugr.es>.
 - García, J. C.; Plaza, C.; Muñoz, F.; Polo, A. (2000). Evaluation of heavy metals pollution on barley crop by agricultural use of municipal solid waste compost. Centro de Ciencias Medioambientales (CSIC). Madrid (Spain). 3rd Internacional Symposium on Geotechnics related to the European Environment. Berlin. Germany. On line in: <http://agrobioenmiendas.iespana.es>.
 - Hettiarachchi, G. M.; Pierzynski, G. M. (2002). In situ stabilization of soil lead using phosphorus and manganese oxide: Influence of plant growth. J. Environ. Qual, 31:564-573.
 - Isla, R. (2004). Efectos de la salinidad de los suelos sobre los cultivos de cebada (*Hordeum vulgare* L.). Análisis de caracteres morfo-fisiológicos y su relación con la tolerancia a la salinidad. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida. Salamanca. España, p.5-17.
 - Jorhem, L. ; Sundström, B. (1993). Levels of lead, cadmium, zinc, copper, nickel, chromium, manganese and cobalt in foods on the Swedish market, 1983-1990. Journal of Food Composition and Analysis, 6 :223-241.
 - Kabata-Pendias, A. (2000). Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press, Inc. Boca Raton. USA. pp. 365, 413.



- Laperche, V.; Logan, T. J.; Gaddam, P.; Traina, S. J. (1997). Effect of apatite amendment on plant uptake of Pb from contaminated soil. *Environ. Sci. Technol.* 31:2745-2753.
- Liao D, Peuquet DJ, Duan Y, Whitsel EA, Dou J, Smith RL. (2006). GIS approaches for the estimation of residential-level ambient PM concentrations. *Environ Health Perspect* 114:1374-1380; doi:10.1289/ehp.9169 [Online 8 June 2006].
- Liao H; Rubio G; Yan X; Cao A; Brown K.M. y Lynch J.P. (2001a). Effect of phosphorus availability on basal root shallowness in common bean. *Plant and Soil* 232:, 69-79.
- Liao H; Ge Z. y Yan X. (2001b). Ideal root architecture for phosphorus acquisition of plants under water and phosphorus coupled stress: from simulation to application. *Chinese Science Bulletin*, 46, 1346-1351.
- López-Perea P., Guzmán-Ortiz F. A., Santos-López E. M., Prieto-García F. y Román-Gutiérrez A. D. (2005). Evaluación de la calidad física de diferentes variedades de cebada (*hordeum sativum* jess) cultivadas en los estados de Hidalgo y Tlaxcala, México. *Revista Chilena de Nutrición*. Vol. 32 (3). p. 247-253.
- Mahler, R. L. (2003). General overview of nutrition for field and container crops. *In*: Riley, L. E.; Dumroese, R. K.; Landis, T. D. Tech Coords. National Proceeding: Forest and Conservation Nursery Associations. 2003 June 9-12; Coeur d'Alene, ID; and 2003 July 14-17; Springfield, IL. Proc. RMRS-P-33.
- Malagón Avilés, O. G. (2007). Ecotoxicología. Guía Didáctica. Editorial de la Universidad técnica particular de Loja. Ecuador. Segunda Edición, Cuarta Reimpresión, ISBN-978-9978-09-495-2, p. 77-79.
- Méndez B. J. (2004). XVII Curso de especialización FEDNA. Metales pesados en alimentación animal. COREN S. C. L. 32003 Orense.
- Moral, R.; Palacios, G.; Gómez, I.; Navarro, J.; Mataix, J. (1994). Distribution and accumulation of heavy metals (Cd, Ni and Cr) in tomato plant. *Fresenius Environmental Bulletin*, 3:395-399.
- Naidu, R.; Smith, E.; Owens, G.; Akter, K.; Khan, N. I.; Imamul, S.; Rahman, M. (2006). Potential Arsenic Exposure Pathways in Bangladesh. Paper presented in the 6th International Conference on "Safe Water and Safe Food Options in Arsenic Mitigation: Lesson Learnt", held 4-5 January, 2006 at Dhaka. Organized by Dhaka Community Hospital, Bangladesh, SOES, Jadavpur University, India, School of Public Health, Harvard University, USA and CERAR, UniSA, Australia. Book of Abstracts. 25-27.
- Opazo, J.D.; Fernández, L. y Carrasco, M.A. (2000). Ensayos biológicos en macetas con trébol subterráneo en suelos del secano costero, VI Región de Chile. I. Metodología. *Agricultura Técnica (Chile)* 59: 223-232.
- Pearson JN, Rengel Z, Jenner CF, Graham RD. (1996). Manipulation of xylem transport affects Zn and Mn transport into developing wheat grains of cultured ears. *Physiologia Plantarum* 98: 229±234.
- Pérez, L.; Moreno, A. M.; González, J. (2004). Índices de acumulación de metales pesados en granos y hojas de trigo. *Schironia*, 3:5-9.



- Prieto Méndez, J.; González Ramírez, C. A.; Román Gutiérrez, A. D.; Prieto García, F. (2009). Plant contamination and phytotoxicity due to heavy metals from soil and water. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10 (1): 29 – 44.
- Prieto, F.; Lucho, C. A.; Poggi, H.; Acevedo, O.; Barrado, E. (2007a). Caracterización Físicoquímica Y Extracción Secuencial De Metales Y Elementos Trazas En Suelos De La Región Actopan-Ixmiquilpan Del Distrito De Riego 03, Valle De Mezquital, Hidalgo, México. *Ciencia ErgoSun*. 14(1):69-80.
- Prieto, F.; Callejas, J.; Román, A. D.; Prieto, J.; Beltrán, R. I. (2007b). Bioacumulación y daños genotóxicos en cultivos de cebada cervecera (*Hordeum distichon* L) y habas (*Vicia faba*) por presencia de arsénico en aguas y suelos de Zimapán, Hidalgo, México. *Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 91:63-68.
- Welch R.M. (1995). Micronutrient nutrition of plants. *Crit. Rev. Plant Sci.* 14, 49-82

Sitios Internet

- http://reportes.siap.gob.mx/Agricola_siap/ResumenProducto
- <http://www.ars-grin.gov/npgs/tax>. USDA Agricultural Research Service , 2007
- http://www.google.es/imgres?imgurl=http://www.uc.cl/sw_educ/cultivos/cereales/cebada/F403.gif&imgrefurl, 2010
- <http://www.infoagro.com/herbaceos/forrajes/cebada.asp>
- <http://www.siap.gob.mx/> , septiembre 2009
- <http://www.mcx.es/plaguicidas/matalpesaUE.asp>



IV. Objetivos

IV. 1. Objetivos Generales.

- Evaluar y caracterizar de manera integral los suelos y el cultivo de cebada (*Hordeum distichum L*) en los municipios de Almoloya, Apan y Emiliano Zapata, del estado de Hidalgo.
- Correlacionar causas generales y/o medio ambientales que propician reducción en los rendimientos e incremento de rechazo de la producción por incumplimiento de la calidad maltera.
- Establecer indicadores e índice de calidad para suelos cebaderos y cultivo de cebada maltera.

IV.2. Objetivos Específicos.

- ♦ Determinar por caracterización fisicoquímica la composición de los suelos, en muestras colectadas en parcelas al momento de cosecha, en los municipios de Almoloya, Apan y Emiliano Zapata, del estado de Hidalgo y determinar aspectos que incidan en afectaciones a los rendimientos del cultivo y/o rechazo por no cumplir calidad maltera.
- ♦ Evaluar y cuantificar la presencia de elementos metálicos tales como sodio, potasio, calcio, magnesio, y elementos tóxicos como plomo, níquel, manganeso y cadmio, en los suelos de cultivo en cada municipio.
- ♦ Evaluar presencia de los elementos metálicos antes mencionados en plantas y suelos mediante ensayos en maceta.
- ♦ Evaluar de manera integral el cultivo de cebada en diferentes parcelas, en cada uno de los municipios: Apan, Almoloya y Emiliano Zapata, estado de Hidalgo.
- ♦ Evaluar y caracterizar por análisis proximales y por órganos del cultivo, al momento de la cosecha y evaluar la presencia de elementos metálicos en parte y órganos del cultivo, en cada municipio.
- ♦ Establecer correlaciones entre aquellos parámetros de mayor incidencia en lo relativo a afectaciones a los rendimientos y rechazo del producto.
- ♦ Proponer y establecer indicadores e índice de calidad para suelos (ICS) cebaderos y para el cultivo de cebada maltera (ICCM)
- ♦ Realizar estudio comparativo de técnicas para evaluar poder germinativo en semillas de cebada. Proponer método alternativo.



V. Metodología Experimental.

Este capítulo consta de diez apartados que comienzan con la ubicación del área de estudio, su localización y descripción; posteriormente se describen las muestras, su obtención y preparación. Un apartado describe los estudios y ensayos realizados sobre el cultivo en macetas, otros están dedicados a los análisis de caracterización de suelos y el cultivo en parcelas naturales, Igualmente se tiene un apartado en el que se establece el uso de indicadores e índices de calidad de suelos y de calidad del cultivo de cebada. Finalmente se indica la metodología para los análisis estadísticos y de correlación de resultados.

V.1. Área de estudio. Localización.

El área de estudio comprende los municipios de Apan, Almoloya y Emiliano Zapata, en el estado de Hidalgo. En la figura V.1 se muestra un mapa general de ubicación de la zona estudiada (circulada el área de estudio) se indican los puntos de muestreo específicos en las parcelas (P1 a la P7). En la tabla V.1. se indican los datos de ubicación de la región de estudio (<http://www.inforganic.com/node/2008>).



Figura V.1. Mapa general de ubicación de la zona a estudiar. Municipios de Apan (Parcelas P4 y P5), Almoloya (Parcelas P1, P2 y P3) y Emiliano Zapata (Parcelas P6 y P7).



Tabla V.1. Características de las regiones de estudio del estado de Hidalgo, México.

Región	Localidad	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Temperatura °C
1	Almoloya	19° 45' 14.4"	98° 21' 57"	2 730	12.2
2	Apan	19° 41' 16.6"	98° 23' 33"	2 547	14.1
3	E. Zapata	19° 54' 16.0"	98° 53' 4"	2 355	15.4

V.2. Muestras. Obtención y preparación.

V.2.1. Muestras de plantas y suelos.

Se tomaron muestras de las diferentes parcelas (P1 a la P7, entre los tres municipios). En cada parcela se tomaron de forma aleatoria, muestras de plantas completas (raíz, tallo, hoja, espiga y granos) y muestras de suelos del mismo sitio de donde se toman las plantas. En la figura V.2 se muestra la forma esquemática y general en que se tomaron las muestras de plantas y suelos. Además se tomaron otras muestras de suelos (45 kg, 15 kg por cada parcela a estudiar por cada municipio), mismo que se utilizó para los estudios en macetas.

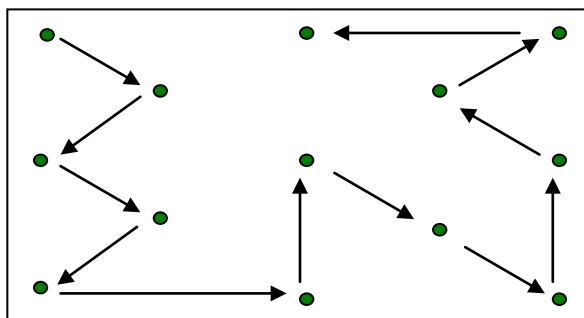


Figura V.2. Forma general de recolección o toma de muestras de suelos y plantas en cada una de las parcelas por cada Municipio.

Las parcelas se identifican de la siguiente manera:

a) Municipio Almoloya: P1, denominada parcela La Vega, de 7ha, por sus alrededores, es atravesada por un arroyo derivado del río Cuatlaco; P2, identificada como parcela El Sabinal, de 6ha, por un lateral próximo, circula un arroyo denominado Barranca de Almoloya y finalmente, P3, denominada como parcela La Peña, de 5ha, sin incidencias de aguas superficiales cercanas.

El municipio de Almoloya se localiza a 66 kms. de la ciudad de Pachuca por la vía corta a ciudad Sahagún, sus coordenadas geográficas son: 19°42' latitud Norte y 98° 24' latitud Oeste, a una altura de 2,520 metros sobre el nivel del mar (msnm). Colinda al norte, con el municipio de Apan y el estado de Puebla; al este, con los estados de Puebla y Tlaxcala; al sur con el estado de Tlaxcala y el municipio de Apan; al oeste; con el municipio de Apan. Este municipio representa el 1.35% de la superficie del estado, con una extensión territorial de 282.70 km². Se localiza en el Eje Neovolcánico, formado por lomeríos en un 70% de su superficie y por llanuras en el 30% restante. Sus principales elevaciones son el Cerro La Peñuela, El Cuervo, Coronilla, Cuautlatilpan, Coyote, Las Águilas, San Antonio, El Muerto,



El Manguillo, Blanco, Cuatro Vientos, Zotoluca y el Cerro la Peña el Tepozán; en donde el más notable de ellos presenta una altitud sobre el nivel del mar de 3,350 metros, y el cerro de menor altura se encuentra a 2,370 metros (<http://www.inforganic.com/2008>).

En lo que respecta a la hidrología del municipio, se encuentra posicionado en las regiones del Pánuco y Tuxpan-Nautla, en las cuencas del Río Moctezuma y el Río Tecolutla, derivando del primero la subcuenca de Lago Tuchac y Tecocomulco; y del segundo la subcuenca del Río Laxaxalpan. Las corrientes de agua que conforman el municipio son: El Tepozán, Río Frío, Río Cuatlaco, Barranca El Charro, Barranca Melcochero, Río Santa Inés y Río Mala Yerba.

El municipio presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano en la mayor parte de la superficie municipal, (65.41%) principalmente en las localidades de Tepepatlaxco, Cuatlaco, La Presa, San José Coliuca, El Tepozán, Huimiyucan, Rancho Nuevo y Las Vigas. Mientras que en las localidades de Tepetlayuca, Santiago Tetlapayac y San Isidro Tetlapayac existe un clima templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad en un 34.59% de la superficie.

Su temperatura promedio mensual oscila entre los 8.5°C y los 15°C para los meses de diciembre y enero que son los más fríos del año. En los meses de mayo y junio, se registran las temperaturas más altas. Su temperatura promedio anual en el municipio es de aproximadamente 11.9°C. Con respecto a la precipitación anual, el nivel promedio es de 656 mm., teniendo mayor precipitación durante los meses de septiembre y octubre, y en menor proporción en diciembre, febrero, abril y mayo. Presenta una vegetación semidesértica, con especies forestales como: pino, oyamel, encino y cedro rojo, además de algunas otras coníferas, latifoliadas no especificadas y con predominio de pastizal. Su fauna se integra principalmente por venado, coyote, tlacuache, armadillo, liebre, conejo, tuza, hurón, zorrillo, cacomixtle, palomas de distintas especies, patos, garza, chichicuilete, agachón, tordo, tórtola, tecolote, quebrantahuesos, cuijes, gorrión, además de una gran variedad de reptiles, insectos y arácnidos.

El uso potencial del suelo es en su mayoría agrícola, teniendo una producción de maíz, cebada y frijol en un 76.12% de la superficie municipal. El uso del suelo destinado al bosque tiene una superficie de 15.79% donde existe el Oyamel, Encino, ladrillo y Pino colorado. También un 5.83% de la superficie, es destinada a pastizal, cultivando grama negra y zacate, navajita utilizada principalmente como forraje. Además 1.32% es de matorral, produciendo entre otros, nopal, cardón, uña de gavilán y palma izote; restando un 0.94% para otros cultivos. En este municipio se cultiva por orden de importancia en hectáreas cosechadas: cebada en grano, maíz, trigo en grano, avena en grano, frijol, maguey pulquero, papa, además destinan parte de la tierra para el cultivo de haba grano, nopal tunero, alfalfa verde, haba verde y calabacita, aunque en muy poca producción.

b) Municipio Apan: P4, denominada parcela del Tío Chano, de 5ha y la P5, que se identifica como parcela La Panadera, de 5ha también. Es de hacer notar



que en la parcela P5 (La Panadera) se observó algunas partes del cultivo enfermo o dañado, al parecer por algún tipo de hongo.

El municipio de Apan, está situado a 92.6 km. de la capital de la República, por la línea del ferrocarril mexicano y a sólo 64 km de la capital del estado. Sus coordenadas geográficas son; 19° 42' latitud norte, 98° 27' latitud oeste, a una altura de 2480 metros sobre el nivel del mar (msnm). Colinda al norte con los municipios de Tepeapulco y Cuautepéc de Hinojosa; al este con el estado de Puebla y el municipio de Almoloya; al sur con Almoloya y el estado de Tlaxcala, y al oeste con los municipios de Emiliano Zapata y Tepeapulco. En lo que corresponde a sus localidades principales, cuenta con Lázaro Cárdenas, Chimalpa, La Laguna, Zotoluca, Acopinacalco y San José Jiquilpan. Este municipio representa el 1.7% de la superficie del estado, con una extensión territorial de 346.9 km. Apan se encuentra localizado en el eje neovolcánico en un 25% y 45% de llanuras. No existe alguna elevación muy notable debido a las dimensiones del territorio, sin embargo, la más nombrada es el cerro Chulgo que presenta una altitud sobre el nivel del mar de 2900 metros. También existen elevaciones como el cerro de Cuautla, el Toronjil y el Viejo de Tultengo que se encuentran por arriba de los 3000 msnm., el Cerro Colorado, Cocinillas, San Fernando, La Loma y Las Ventas; las dos últimas muy cercanas a la cabecera del municipio (<http://www.inforganic.com/2008>).

Con respecto a la hidrología del municipio, Apan se encuentra posicionado en la región del Pánuco, en la cuenca del Río Moctezuma, de la cual derivan dos subcuencas: la del Río Tezontepec que cubre el 0.60% de la superficie municipal y la Laguna Tuchac y Tecocomulco que riega el 99.40% restante. Las corrientes de agua que conforman el municipio son: Cuatlaco, El Muerto, La Leona, Encinos, Sol, Magdalena y Tinajas.

El municipio presenta un clima subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media en la mayor parte de la superficie municipal, (98.82%) aunque también presenta un clima subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad en las localidades de San Juan y San José Jiquilpan. La temperatura promedio mensual en el municipio oscila, entre los diez grados centígrados para los meses de diciembre y enero que son los más fríos del año y los diecisiete grados para el mes de mayo que registra las temperaturas más altas. La estación meteorológica de la ciudad de Apan tras 23 años de observación a estimado que la temperatura anual promedio en el municipio es de aproximadamente 14.4°C. Con respecto a la precipitación anual en el municipio, el nivel promedio observado es de alrededor de los 622 mm. según datos observados desde hace más de 23 años, siendo los meses de junio y agosto los de mayor precipitación y los de febrero y diciembre los de menor. En general, el clima presente en el municipio se puede catalogar como no extremo y templado.

La flora en el municipio tiene una vegetación poco abundante, sin embargo cuenta con, los mejores pastos para el ganado lanar, el terreno es preferente para el cultivo de maguey, pinos de diversas clases, encinos y sabinos. La fauna



perteneciente a ésta región está compuesta por gavián, pato, chichicuilete, agachón, tordo, tórtola, tecolote, gorrión, venado, coyote, tlacuache, armadillo, liebre, conejo, tuza, hurón, zorrillo, cacomixtle y una gran variedad de reptiles, insectos y arácnidos.

El uso potencial del suelo en Apan es en su mayoría agrícola; presenta un 64% de temporal, 3% de pastos naturales, 0.2% de bosque o selva; el restante lo destina a otros usos. Apan presenta suelos de gran calidad, se dan buenas cosechas de maíz, cebada, frijol, alberjón y haba; la agricultura en este municipio es en su mayoría de temporal, sus terrenos facilitan la siembra de cebada en grano, trigo en grano, maíz y frijol principalmente, aunque también se cultiva la calabacita, tomate verde, avena en grano, alberjón, haba en grano, maguey pulquero, praderas y nopal tunero aunque no en la misma proporción.

c) Municipio Emiliano Zapata: P6, identificada como Bonilla I, de 2ha y la P7, de 6ha que se identificó como Bonilla II.

Emiliano Zapata se localiza entre los paralelos 19° 39´ latitud norte y 98° 33´ longitud oeste a una altitud de 2500 metros sobre el nivel del mar (msnm). Cuenta con una superficie de 36 km², representa el 0.17% de la superficie total del estado. Se caracteriza por ser un territorio plano, localizado en el eje Neovolcánico formado por lomeríos en un 70% y llanura en un 30%. Las principales fuentes hidrológicas de este municipio son el río Panuco y Cuenca río Moctezuma, también encontramos algunos pozos, manantiales y presas. Se presenta un clima templado-frío, con una temperatura anual de 15°C; precipitación pluvial media de 600 milímetros por año (<http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/hidalgo/municipios/13021a.htm>).

La flora está formada principalmente de maguey y nopal así como de cactus, arbustos leñosos de diversos tipos o matorrales, árboles de pirúl, capulín además de contar con diferentes árboles frutales y una gran cantidad de hierbas silvestres que se utilizan para remedios caseros. Las especies que predominan en este territorio son conejo, liebre, ardilla, tuza, coyote, venado, tlacuache, armadillo, hurón, zorrillo, cacomixtle, palomas de diferentes especies como patos, garzas, chichicuilete, agachón, tordo, tórtola, tecolote, quebrantahuesos, gorrión y una variedad de reptiles, insectos y arácnidos.

Su suelo es de la era mesozoica; semi-desértico y rico en materia orgánica y nutrientes, el uso principal de la tierra es agrícola y cría de ganado, la mayor parte es pequeña propiedad y ejidal. En este municipio los principales cultivos registrados son la cebada en grano, maíz, frijol; es importante destacar que estos cultivos son de temporada primavera-verano.

Los cálculos para definir los tamaños de las muestras se realizaron partiendo de la siguiente expresión (Münch, *et al.*, 1998; Tamayo, *et al.*, 1998):



$$n = \frac{Z^2 \times p \times q \times N}{N \times e^2 + Z^2 \times p \times q} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde: n es el tamaño de la muestra a tomar; p la probabilidad a favor; q la probabilidad en contra; Z el nivel de confianza; N como universo o población total y e nivel de error de estimación. Se consideraron como tamaños de la población (N) y tamaños de muestras (n) para los análisis de caracterización de suelos, los que se indican en la tabla V.2. Las muestras de suelos (n_{suelos}) de la tabla fueron tomadas en cada punto de toma de plantas que se indicó en la figura V.2.

Tabla V.2. Tamaños de población (N) y tamaños de muestras (n) para suelos, por municipios y parcelas.

Municipio/Parcela	N suelos (m ³)	n suelos (kg)
Almoloya P1	147000	4.83
Almoloya P2	108000	3.82
Almoloya P3	75000	2.90
Apan P4	75000	2.90
Apan P5	75000	2.90
E. Zapata P6	34000	1.45
E. Zapata P7	108000	3,82
TOTALES	622000	22.62

V.2.2. Preparación de las muestras de suelos y plantas para los análisis.

Los suelos fueron inicialmente secados en charolas y bolsas de plásticos colocándolos al sol. Posteriormente se les limpió manualmente de todo objeto extraño como hojarascas, piedras o insectos. Una vez secos y limpios, se reservaron para análisis de caracterización.

Las muestras de suelos tomadas para los estudios en macetas (60-90kg, 30 kg por cada parcela a estudiar) por cada municipio, fueron secadas a temperatura ambiente, mezcladas, homogenizadas y limpiadas manualmente.

Las plantas colectadas e identificadas por parcelas de cada municipio, fueron homogéneamente unidas y luego, lavadas con chorro de agua para retirar todo tipo de partículas de tierra y polvo. Fueron también colocadas en charolas plásticas para ser secadas al sol durante tres días, hasta sequedad total. Posteriormente fueron separados y cortados en sus órganos respectivos (raíz, tallo, hojas, espigas y granos). Luego fueron secados en estufa a 60°C por 72 horas, por cada órgano separado; triturados en mortero y reservados en frascos plásticos y limpios para posteriores análisis.

V.3. Estudios en macetas.

Se prepararon las macetas (45 en total), para siembra de semillas de cebada (15 macetas con suelos por cada municipio). En cada maceta se agregó aproximadamente 1Kg. de suelo; previamente adicionando en el fondo, una capa de unos dos cm de altura, gravilla, con la finalidad de evitar o minimizar las pérdidas de suelos durante los procesos de riego (figura V.3).

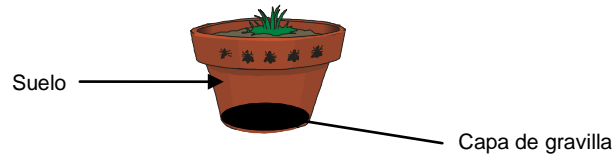


Figura V.3. Esquema de presentación de ensayos en macetas.

Los riegos se realizaron dos veces al mes con adiciones de 500 ml de agua por maceta (1 litro de agua al mes). Para ello se utilizó agua limpia (no contaminada, como ensayo en blanco de referencia “A”), agua contaminada con Pb^{2+} en concentración de 0,50 mg/L (ensayo “B”) y agua contaminada con Ni^{2+} en concentración de 0.50 mg/L (ensayo “C”). El montaje de todo el estudio en maceta se realizó según el esquema que se muestra en la figura V.4. Se colocaron 5 réplicas de macetas (1 a 5) por cada serie (de la A a la C) para cada uno de los municipios (1 a 3); cada una de estas macetas, conteniendo 5 semillas del cultivo, mantenidas en las condiciones experimentales que se describen en la tabla V.3.

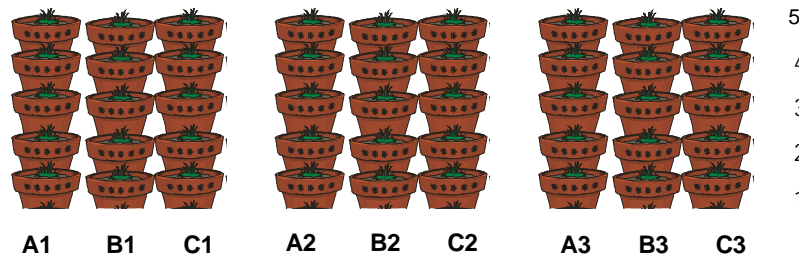


Figura V.4. Esquema representativo del estudio de bioacumulación de metales en macetas para cultivos de cebada.

Tabla V.3. Condiciones experimentales para los ensayos en macetas.

A1	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3	C3
1SAL/A	1SAL/Pb	1SAL/Ni	1SAP/A	1SAP/Pb	1SAP/Ni	1SEZ/A	1SEZ/Pb	1SEZ/Ni
2SAL/A	2SAL/Pb	2SAL/Ni	2SAP/A	2SAP/Pb	2SAP/Ni	2SEZ/A	2SEZ/Pb	2SEZ/Ni
3SAL/A	3SAL/Pb	3SAL/Ni	3SAP/A	3SAP/Pb	3SAP/Ni	3SEZ/A	3SEZ/Pb	3SEZ/Ni
4SAL/A	4SAL/Pb	4SAL/Ni	4SAP/A	4SAP/Pb	4SAP/Ni	4SEZ/A	4SEZ/Pb	4SEZ/Ni
5SAL/A	5SAL/Pb	5SAL/Ni	5SAP/A	5SAP/Pb	5SAP/Ni	5SEZ/A	5SEZ/Pb	5SEZ/Ni

Leyenda: c: Cebada

A_{1, 2 y/o 3}: SAL-Suelo de Almoloya, SAP-Suelo de Apan, SEZ-Suelo de Emiliano Zapata, regado con A-Agua no contaminada. EXPERIMENTO “A”

B_{1, 2 y/o 3}: SAL-Suelo de Almoloya, SAP-Suelo de Apan, SEZ-Suelo de Emiliano Zapata, regado con Pb-Agua contaminada con Pb^{2+} (0.50 mg/L). EXPERIMENTO “B”

C_{1, 2 y/o 3}: SAL-Suelo de Almoloya, SAP-Suelo de Apan, SEZ-Suelo de Emiliano Zapata regado con Ni-Agua contaminado con Ni^{2+} (0.50 mg/L). EXPERIMENTO “C”

En cada maceta fueron sembradas 5 semillas, posicionándolas en distancias aproximadamente iguales. Según el esquema de la figura V.5. Por cada una de las etapas de crecimiento y desarrollo de la planta (5 etapas), se toma una de cada una de las cinco réplicas del cultivo, comenzando a partir de la formación del coleoptilo (primera hoja). Se separan en cada una de sus partes, y son secadas, trituradas y digestadas, para la realización de los análisis de bioacumulación de los metales en estudio, por cada una de las partes (raíz, tallo, hoja, espiga y grano) según la etapa de desarrollo del cultivo.

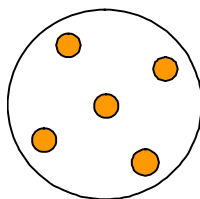


Figura V.5. Esquema representativo de la distribución de semillas sembradas en macetas.

V.4. Análisis de caracterización de suelos.

A los suelos de este estudio se les realizó los siguientes análisis, (según NOM 021 RECNAT 2000). Partiendo del extracto de saturación (AS-16) de las muestras de suelo se midió:

V.4.1. pH (potenciometría) en extracto de saturación de suelo.

El pH es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos rutinarios de suelo, ya que controla reacciones químicas y biológicas en el suelo. El pH se mide potenciométricamente en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo:agua 1:2. Se pesan 10g de suelo en un frasco de vidrio, posteriormente se adiciona 20ml de agua destilada. Con una varilla de vidrio, se agita manualmente la mezcla de suelo durante 30 minutos y se deja reposar durante 15 minutos. En la fase acuosa se realiza la medición del pH. Para la clasificación del suelo en cuanto a su valor de pH se utiliza el criterio que se resume en la tabla V.4.

Tabla V.4. Clasificación de suelos según el pH (Boulding, 1995)

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

V.4.2. Conductividad (conductimetría) en extracto de saturación de suelo.

La medición de la conductividad de los suelos se realiza en el extracto de saturación. La conductividad eléctrica (CE) es uno de los índices más difundidos para evaluar la concentración salina del suelo a nivel de laboratorio y se reporta en decisiemens por metro ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$). En la tabla V.5 se indica el criterio que se puede seguir para clasificar los suelos por su salinidad.

Tabla V.5. Clasificación de suelos por evaluación de la salinidad, medida a partir de la conductividad eléctrica en los extractos de saturación (Boulding, 1995)

Efectos	CE dS m^{-1} a 25°C
Efectos despreciables de salinidad	< 1.0
Muy ligeramente salino	1.1 - 2.0
Moderadamente salino	2.1 – 4.0
Suelo salino	4.1 – 8.0
Fuertemente salino	8.1- 16.0
Muy fuertemente salino	> 16.0



V.4.3. Potencial redox (potenciometría) en extracto de saturación de suelo.

La medida del potencial redox en medios naturales demuestra la capacidad de óxido-reducción, causada directamente por las condiciones químicas de éste, que muy a menudo son inducidas por actividades microbiológicas (por ejemplo, bacterias sulfato-reductoras y ferrobacterias). La medición requiere un equipo sencillo, pero debe ser capaz de proporcionar las condiciones en que se encuentra el medio natural, así como el efecto de los contaminantes. Para la medición se utiliza un electrodo de Pt y se sigue la metodología usada para la medición del pH (tabla V.6).

Tabla V.6. Parámetros de potencial Redox (Boulding, 1995)

Clasificación	mV
Altamente oxidante	> + 400
Intermedio	+400 a -100
Altamente reductor	< -100

V.4.4. Potencial Zeta (potenciometría) en extracto de saturación de suelo.

Se toman de la disolución obtenida del extracto de saturación de suelo (según NOM 021 RECNAT 2000, técnica AS-16), 10ml y se llevan a 50ml, en matraces aforados; esta operación se realiza 6 veces, es decir se tendrán en total seis suspensiones preparadas a partir de la misma suspensión. Se trasvasan a 6 vasos de precipitado correspondientes agitando y ajustando el pH para cada una de las determinaciones. Para ello se colocarán cada vaso conteniendo la suspensión en la parrilla de agitación y con ayuda del pH metro se tomará la lectura inicial del pH y se ajustará, con adiciones de ácido nítrico 0.1 M y/o hidróxido de sodio 0.1 M según corresponda a valores de pH de 2.00; 4.00; 6.00; 7.00; 8.00 y 9.00. A cada una se le mide el potencial zeta (ρZ) (Malvern, 2004).

V.4.5. Humedad (gravimetría) en suelo.

A partir de las muestras de suelos, directamente se realizan los análisis de humedad y siguientes. La determinación de la masa de agua se realiza por la diferencia en peso entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco (NOM 021 RECNAT, 2000). Se considera como suelo seco aquél secado a la estufa a 105°C hasta obtener un peso constante. Los frascos de vidrio, se colocan en la estufa por un mínimo de 8 horas a una temperatura de 105°C, posteriormente se registra el peso y se vuelve a introducir los frascos a la estufa hasta que se logre un peso constante en las muestras, todo este procedimiento previo al enfriamiento de los frascos que se colocan en un desecador. Los frascos fríos son pesados y éste será el peso del frasco (PB). Posteriormente se coloca la muestra 10 a 15 gramos, aproximadamente. Se pesa el frasco con el suelo húmedo, este peso deberá ser el peso del frasco más el suelo húmedo (PB + Psh). El frasco ya pesado se coloca en la estufa a una temperatura de 105°C por 24 horas. Posteriormente se enfría, se pesa el bote con la muestra seca, este peso será el peso del frasco más el peso del suelo seco (PB + Pss). Se repite este procedimiento hasta obtener el peso constante. Con los datos obtenidos en el



procedimiento, se calcula el contenido de humedad a partir de la siguiente ecuación:

$$g = \left(\frac{(PB + Psh) - (PB + Pss)}{(PB + Pss) - PB} \right) * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

g = Contenido de humedad gravimétrica expresado en porcentaje (%).

PB = Peso del frasco (g).

Psh = Peso de suelo húmedo (g).

Pss = Peso del suelo seco (g).

V.4.6. Materia orgánica en suelo. Método de Walkley y Black.

La materia orgánica (MO) se encuentra en los suelos formando parte de tres tipos de compuestos: a) Formas muy condensadas de composiciones próximas al carbono elemental (carbón vegetal, grafito, carbón de hulla); b) Residuos de plantas, animales y microorganismos, alterados y resistentes, denominados humus y humatos y c) Residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos (Jackson, 1987). La determinación de la MO resulta fundamental para el conocimiento de la productividad agrícola y forestal de los suelos (Labrador, 1996; Davel *et Ortega*, 2003; Álvarez *et Steinbach*, 2006; La Manna *et al.*, 2007). Existen diferentes técnicas analíticas para su determinación, las cuales están muy difundidas: el método de pérdida por ignición, el método de oxidación con permanganato y el método de combustión húmeda de Walkley - Black (NOM-021-RECNAT-2000).

El método de pérdida por ignición se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a una temperatura de 430°C en horno-mufla durante 24 h (Davies, 1974). Con temperaturas de 430°C se lograría una completa oxidación de la MO. Así este método permite la determinación de la MO total del suelo, incluyendo las formas condensadas, humus, humatos y residuos orgánicos poco alterados (Davies, 1974). Otros estudios han determinado que aún a 600°C parte de las sustancias húmicas permanecen resistentes a la oxidación. Sin embargo, temperaturas mayores a 500°C pueden implicar importantes errores en la determinación por pérdidas de dióxido de carbono de los carbonatos, agua estructural de los minerales de arcilla, oxidación del ión ferroso, descomposición de sales hidratadas y óxidos (Rosell *et al.*, 2001). El método de pérdida por ignición resulta un método económico dado que no se utilizan reactivos químicos y requiere pocas horas hombre para su realización.

El método del permanganato determina sólo una parte del carbono orgánico, discriminando las formas condensadas y excluyendo en un 90 a 95% el carbono elemental (Jackson, 1987). Dado que la oxidación de la MO que se logra es incompleta se utiliza un factor de corrección que puede variar de acuerdo al tipo de suelo y al horizonte considerado (Rosell *et al.*, 2001; Certini *et al.*, 2002a; Certini *et al.*, 2002b; De Vos *et al.*, 2007). El factor de corrección generalmente utilizado es 1.32 que se basa en la suposición de que el 76% del carbono es



oxidado (1/0,76=1,32) (Rosell *et al.*, 2001). Fundamentalmente se determina con este método la MO que está disponible en los extractos coloidales de la fase acuosa de los suelos (Rosell *et al.*, 2001).

El método de combustión húmeda de Walkley-Black consiste en una oxidación con dicromato de potasio en medio de ácido sulfúrico. La reacción toma el calor de la disolución del ácido, lo que eleva la temperatura y logra la oxidación del carbono orgánico. El dicromato residual es posteriormente titulado con una sal ferrosa (Carreira, 2005). Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84% del carbono orgánico total por lo que es necesario introducir también un factor de corrección, el cual puede variar entre suelo y suelo. En los suelos de México (NOM-021-RECNAT-2000) se recomienda utilizar el factor 1.298 (1/0.77), para los cálculos se hizo uso de la siguiente expresión:

$$\% \text{ C Orgánico} = \left(\frac{B - T}{g} \right) (N) (0.39) \text{ mcf} \tag{Ec.3}$$

donde:

B=Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (ml).

T = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml).

N = Normalidad exacta del sulfato ferroso amoniacal

g = Peso de la muestra empleada (g).

mcf = factor de corrección de humedad.

% Materia orgánica = % C Orgánico x 1.724

El factor 0.39 resulta de multiplicar (12/4000)*(1/0.77)*100=0.39

donde:

(12/4000) es el peso miliequivalente del C, (1/0.77) es un factor de corrección debido a que se supone que el método sólo oxida 77% del C, y 100 es la conversión a porcentaje. En la mayoría de los laboratorios se sigue usando el factor de Van Bemelen de 1.724 para estimar la materia orgánica, a partir de C orgánico, el cual resulta de la suposición de que la materia orgánica contiene un 58% de C, (1/0.58)= 1.724. Los valores de referencia para clasificar la concentración de la materia orgánica en los suelos minerales y volcánicos se presenta en la tabla V.7:

Tabla V.7. Clasificación de suelos en base a los contenidos de materia orgánica según sean suelos volcánicos o no volcánicos (Boulding, 1995).

Clasificación	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 – 6.0	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11.0 - 16	3.6 - 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

En este método también puede ser utilizado otro factor para convertir la determinación de carbono orgánico en valores de MO. Este factor también puede variar de acuerdo al tipo de suelo. Algunos trabajos han considerado un factor 2 (Buduba, 2006), basado en la suposición de que el carbono orgánico representa el



50% de la MO. A su vez, distintos autores sugieren un factor cercano a 2 para horizontes superficiales (Carreira, 2005).

Distintas interferencias pueden afectar la cuantificación de MO por el método del permanganato y el método de Walkley-Black, por ejemplo, presencia de iones cloruro o ferroso y óxidos de manganeso. A pesar de estas dificultades ambos métodos son ampliamente utilizados porque requieren un equipamiento mínimo, pueden adaptarse para la manipulación de gran número de muestras y no son muy costosos (Rosell *et al.*, 2001).

Las propiedades de la MO del suelo son influenciadas también por el clima, la topografía, el material parental, la vegetación y el tiempo (Rosell *et al.*, 2001). Dadas las características de los métodos analíticos es esperable que la diferencia en los resultados de MO obtenidos difieran en función de los tipos de suelo y vegetación (Brye *et al.*, 2003; De Vos *et al.*, 2005; Lettens *et al.*, 2007).

V.4.7. Nitrógeno total en suelo. Método Kjeldhal.

El nitrógeno total se determina frecuentemente en los análisis de rutina, sin embargo, es escasa su utilidad como indicador de la disponibilidad del nitrógeno en el suelo para las plantas, debido a que la mayor parte del nitrógeno se encuentra en forma orgánica con muy bajas tasas de mineralización. Se toma de referencia como índice de las reservas orgánicas, en la estratificación de sistemas productivos y en los balances en el suelo. La determinación de nitrógeno total por este procedimiento (AS-25) involucra dos pasos: (a) digestión de la muestra para convertir el nitrógeno a NH_4^+ y (b) la determinación de NH_4^+ en el digestado. La digestión de la muestra es desarrollada por calentamiento de la muestra con ácido sulfúrico concentrado y sustancias como el K_2SO_4 que promueven la oxidación de la materia orgánica y la conversión del nitrógeno orgánico a amonio por incremento de la temperatura de digestión y también emplea catalizadores como el Hg, que aumentan la velocidad de oxidación de la materia orgánica por el ácido sulfúrico. El amonio en el digestado es determinado por titulación del amonio liberado por destilación del digestado con álcali.

Para la determinación se coloca una muestra de suelo (0.5 g) en un frasco micro-Kjeldahl seco. Se adiciona una mezcla de catalizadores: 7g de K_2SO_4 , 20 ml de ácido sulfúrico concentrado y 1 g de HgO , calentar en la unidad digestora a temperatura media alta hasta que el digestado se torne claro. Una vez completada esta fase, se deja enfriar el frasco y se agrega suficiente agua para colocar en suspensión, mediante agitación, el digestado (15 a 20 ml son generalmente suficientes). Se transfiere el contenido líquido a la cámara de destilación del aparato, lavando el matraz de digestión con pequeñas porciones de agua; se coloca en el tubo de salida del aparato de digestión un matraz erlenmeyer de 125 ml conteniendo 10 ml de la solución H_3BO_3 más indicadores. Se adicionan cuidadosamente 10 ml de NaOH 50 % de modo que la sosa se deposite en el fondo de la cámara de destilación, se conecta el flujo de vapor y se inicia la destilación y se continua hasta que el volumen alcance unos 75 ml en el frasco



erlenmeyer. Se determina el nitrógeno amoniacal presente en el destilado titulando con el ácido sulfúrico 2 %. Para los cálculos se utilizó la expresión:

$$\% \text{ N total} = (V_m - V_b) \times N \times 14 / p \times 10 \quad (\text{Ec. 4})$$

donde:

V_m = Volumen de ácido sulfúrico empleado en titular la muestra
 V_b = Volumen de ácido sulfúrico empleado en titular blanco
 N = Normalidad exacta del ácido sulfúrico
 14 = Peso equivalente del nitrógeno
 10 = Factor de conversión a porcentaje
 P = Peso de la muestra de suelo en g.

Los resultados de los análisis de nitrógeno total pueden interpretarse para clasificar suelos a partir de la tabla V.8:

Tabla V.8. Clasificación de suelos en función del contenido de nitrógeno para suelos volcánicos y suelos no volcánicos (Boulding, 1995)

Clase	Nitrógeno total (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo		< 0.05
Bajo	< 0.30	0.05 – 0.10
Medio	0.30 – 0.80	0.10 – 0.15
Alto	> 0.80	0.15 – 0.25
Muy alto		> 0.25

V.4.8. Textura de los suelos. Método Bouyoucos.

La textura del suelo se define como la proporción relativa de grupos dimensionales de partículas. Proporciona una idea general de las propiedades físicas del suelo. En este método se elimina la agregación debida a materia orgánica y la floculación debida a los cationes calcio y magnesio. No se eliminan otros cementantes como carbonatos. El tiempo de lectura se ha escogido de 40 segundos para la separación de partículas mayores de 0.05 mm (arena) y de 2 horas para partículas de diámetro mayores de 0.002 mm (limo y arena). Estos límites han sido establecidos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos y se han usado para construir el triángulo (figura 2) de texturas (Boulding, 1995). Se pesan 12.5 g de suelo en un vaso de precipitados de 500 ml, se agregan 5 ml de solución defloculante (hexametáfosfato de sodio con carbonato de sodio), posteriormente se adicionan 50 ml de agua, y se agita durante 10 minutos. Se pasa a una probeta de 250 ml aforando hasta 200 ml con agua destilada, se agita y se coloca el hidrómetro, se espera 1 minuto y tomar lectura (temperatura e hidrómetro). Se deja reposar durante 2 horas y se vuelve a tomar la lectura (temperatura e hidrómetro).

Para los cálculos es necesario corregir las lecturas del hidrómetro agregando 0.36 unidades por cada grado centígrado por encima de 19.5°C (NOM-021-RECNAT-2000). La lectura a los 40 segundos multiplicada por 2 es igual al porcentaje de arcilla más limo (Ec. 5). La lectura obtenida a 2 horas multiplicadas por 2 es igual al porcentaje de arcilla (Ec. 6). Restando de 100 se obtiene el porcentaje de arena



(Ec. 7). El porcentaje de limo se obtiene por diferencia. Cuando se usan 100 g no debe multiplicarse por 2 ya que el hidrómetro está calibrado en porcentajes considerando 100 g de suelo. Con los porcentajes obtenidos de limo, arena y arcilla se determina la textura correspondiente con el triángulo de texturas (ver figura 2.9, página 23)

$$\% \text{ Arcilla} + \% \text{ Limo} = L1 * 2 \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\% \text{ Arcilla} = L2 * 2 \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\% \text{ Arena} = 100 - (\% \text{ Arcilla} + \% \text{ Limo}) \quad (\text{Ec. 7})$$

V.4.9. Saturación de bases en muestras de suelos.

La saturación de bases por el método del acetato de amonio (NOM-021-RECNAT-2000; metodología AS-21). Se fundamenta en el equilibrio que se establece entre una solución extractora de Acetato de Amonio y la muestra del suelo donde se efectúa un intercambio catiónico. Para este intercambio catiónico se utiliza $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N a pH neutro. Los cationes K, Ca, Mg, Na, se determinan en la solución extractora por espectrofotometría de absorción atómica. Se toman 10 ml de pasta saturada de suelo de suelo, se agregan 100 ml de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N y neutro se agita durante una hora, luego se filtra. Del filtrado se toman 25 ml y se agregan 0.5 ml de solución de óxido de Lantano al 5% P/V y se aforan a 100 mL. Se leen los cationes por Absorción atómica directamente. Los cálculos se realizan según:

$$\text{meq K}/100 \text{ ml} = \text{ppm K} \times 100 \text{ ml}/(1000 \times 39.1 \times 25 \text{ ml}) \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\text{meq Ca}/100 \text{ ml} = \text{ppm Ca} \times 100 \text{ ml}/(1000 \times 40.08 \times 25 \text{ ml}) \quad (\text{Ec. 9})$$

$$\text{meq Mg}/100 \text{ ml} = \text{ppm Mg} \times 100 \text{ ml}/(1000 \times 24.3 \times 25 \text{ ml}) \quad (\text{Ec. 10})$$

$$\text{meq Na}/100 \text{ ml} = \text{ppm Na} \times 100 \text{ ml}/(1000 \times 23 \times 25 \text{ ml}) \quad (\text{Ec. 11})$$

V.4.10. Agregados estables en muestras de suelos.

El porcentaje de agregados estables en agua (>0,5 mm) según Certini y colaboradores (2002b) y atendiendo a lo establecido en USDA-NRCS (1999). La estabilidad de agregados en agua, mide la cantidad de agregados que se mantienen estables en agua que fluye. Es recomendable que la estabilidad de los agregados sea determinada en los primeros 7-10 cm del horizonte superficial. La muestra debe ser secada al aire antes de determinar estabilidad de agregados. Se transfieren aproximadamente 50 g de suelo secado al aire al tamiz de 2 mm. Se agita suavemente el tamiz y se recoge el suelo que pasa a través de éste. Se trata de hacer pasar todo el suelo a través del tamiz, empujando suavemente el suelo con el pulgar. Se pesa la muestra tamizada y se toma una submuestra de alrededor de 10 g del suelo tamizado (asegurándose de que el suelo haya estado bien mezclado antes de tomar la submuestra). Se satura un retazo de tela con agua destilada y se apoya sobre una superficie plana. Se coloca el tamiz de 0.25 mm, conteniendo el suelo, sobre la tela mojada, permitiendo que el suelo se humedezca lentamente durante cinco minutos.

El tamiz de 0.25 mm, con suelo, se coloca en un recipiente llenado con agua destilada, de forma que la superficie del agua esté justo por encima de la muestra



del suelo. Se mueve el tamiz hacia arriba y hacia abajo en el agua a lo largo de una distancia vertical de 1.5 cm, a razón de 30 oscilaciones por minuto (una oscilación es un movimiento de arriba abajo de 1.5 cm de largo), durante tres minutos. Es importante que los agregados permanezcan inmersos en agua durante el movimiento hacia arriba.

Luego de la operación anterior, se tamiza en húmedo y se coloca el tamiz con los agregados sobre una tela seca, la que va a absorber el excedente de agua en el tamiz. Luego se coloca el tamiz con los agregados donde se seque la muestra al aire lo más rápido posible. Luego del secado se pesa el tamiz que contiene los agregados. Se prepara una solución de calgón, se sumerge el tamiz con los agregados secos en la solución de calgón (no es necesario sumergir totalmente el tamiz). Se remojan los agregados durante cinco minutos, moviendo periódicamente el tamiz hacia arriba y abajo. Sólo las partículas de arena deberán permanecer en el tamiz. Se enjuaga la arena en el tamiz con agua limpia sumergiendo el tamiz en una cubeta de agua. Se separa el exceso de agua poniendo, primero, el tamiz con la arena sobre una tela seca, y luego, secando al aire. Después del secado, se pesa el tamiz con la arena. El cálculo de los agregados estables en agua (AEA) se realiza según:

$$\text{AEA (\% de suelo } >0.25 \text{ mm)} = (\text{peso AS} - \text{arena}) \times 100 / (\text{peso SS} - \text{arena}) \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde AS es el agregado seco y SS suelo seco.

V.4.11. Velocidad de infiltración en muestras de suelos.

La velocidad de infiltración se evaluó usando el método del doble anillo (ASTM D 3385-88; USDA-NRCS, 1999). Se coloca un anillo de 60 mm de diámetro en el sitio, utilizando los dedos para suavemente afirmar el suelo, solamente alrededor de los bordes internos del anillo para prevenir filtraciones adicionales, no deseables. Se cubre el anillo con una envoltura de plástico y la superficie del suelo dentro del anillo, este procedimiento evita disturbar la superficie del suelo al agregar agua. Se llena una botella plástica hasta una marca previamente aforada de 444 mL, con agua destilada. Se vierten los 444 mL de agua en el anillo recubierto con la envoltura de plástico y posteriormente se retira suavemente la cobertura de plástico tirando con cuidado hacia fuera, dejando el agua dentro del anillo (ver figura V.6 a, b y c).

Se registra el tiempo (en minutos) que requieren 25.0 mm de agua para penetrar en el suelo. La velocidad de infiltración se expresa en mm.h^{-1} .

V.4.12. Densidad aparente en muestras de suelos.

La densidad aparente por el método del cilindro (Blake *et* Hartge, 1986; USDA-NRCS, 1999). Usando una maza y un bloque de madera, se clava un anillo de 3 pulgadas (7.62 cm) de diámetro, con el borde biselado hacia abajo, hasta una profundidad de 7.62 cm (Figura V.7.a). Para una precisa medición del volumen del suelo, debe determinarse la exacta profundidad del anillo. Para hacer esto la altura



del anillo sobre el suelo debe ser correctamente medida. Se hacen cuatro mediciones (a espacios similares) de la altura del borde superior del anillo desde la superficie del suelo y se calcula el promedio.

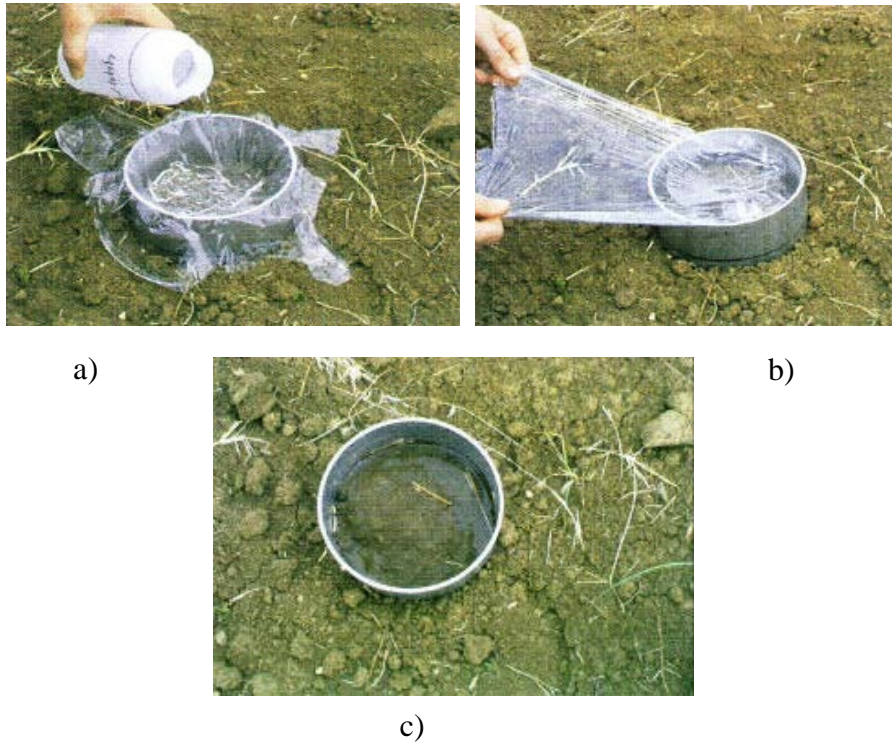


Figura V.6. Ensayo para la determinación de velocidad de infiltración de agua en suelos.



Figura V.7. Ensayo para determinación de densidad aparente en suelos.

Se cava alrededor del anillo, con una palita de jardinero debajo de éste, y se levanta con cuidado previendo no tener pérdidas de suelo. Se remueve el exceso de suelo de la muestra con un cuchillo de hoja ancha o espátula. La base de la muestra deberá ser plana, cortada y nivelada siguiendo los bordes del anillo (Figura V.7. b). Usando el cuchillo de hoja ancha se empuja la muestra dentro de una bolsa de plástico con cierre. Una vez en el laboratorio, se pesa la muestra de suelo en su bolsa, posteriormente se pesa la bolsa vacía para calcular el peso exacto de la muestra.



El suelo debe ser secado en horno y determinada su humedad. El cálculo para la densidad aparente (ξ) se realiza según:

$$\xi(\text{g/cm}^3) = \text{peso del suelo secado en el horno (g)}/\text{volumen del suelo (cm}^3\text{)} \quad (\text{Ec.13})$$

A partir de esta determinación se pueden realizar otros cálculos que pudieran ser útiles, tales como espacio poroso (Δ) y porosidad de los suelos (Π):

$$(\Delta) (\%) = \text{contenido de agua en volumen} \times 100 / \text{Porosidad del suelo} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$(\Pi) (\%) = 1 - (\text{densidad aparente del suelos})/2.65 \quad (\text{Ec. 15})$$

V.4.13. Digestión de las muestras de suelos y análisis de metales.

Para las determinaciones de metales en las muestras de suelos, los mismos se vaciaron en tamices Tyler para obtener partículas menores a 100 micras. Posteriormente se realizó una digestión en un equipo de microondas Mars-X para lo cual, se pesó 0.2 g de muestra de suelo y se adicionan 5 ml de ácido nítrico concentrado, se colocan en el microondas aplicando el método s_cebada-2, que consta de 3 etapas según el control de temperatura o de presión. Una primera etapa para elevar la presión gradualmente hasta 300 PSI por espacio de 10 minutos, una segunda etapa para mantener la presión (300 PSI) constantes durante 10 minutos todo a una potencia de 1200 W y finalmente 5 minutos de enfriamiento. Posteriormente las muestras son filtradas y aforadas a 50 ml con agua desionizada. Son reservadas para las determinaciones de metales. Las determinaciones se realizaron por espectroscopía de emisión atómica con plasma acoplada inductivamente (ICP). Se realizaron en un equipo Perkim Helmer, modelo Óptima 3000. Todas las determinaciones y análisis se realizaron por triplicado.

V.5. Análisis de los lixiviados obtenidos del riego en macetas.

Las muestras de aguas que fueron empleadas para riegos en los estudios en macetas, fueron sometidas a los análisis y determinaciones de pH, conductividad (CE), potencial redox (Eh) y la concentración de los metales en evaluación (Pb^{2+} y Ni^{2+}). Estos análisis se realizan al inicio del riego y a las aguas lixiviadas de las macetas.

V.6. Análisis proximales y de metales por órganos de las plantas recolectadas en cosechas y metales bioacumulados por órganos del cultivo por etapas de desarrollo en los ensayos en macetas.

El análisis proximal se realizó a todas las muestras de acuerdo al método establecido por AOAC (1995a y b), realizando los análisis de humedad según método 925.10, cenizas según método 923.03, Fibra dietética total según método 962.09, Proteínas según método 46.10 establecido por la AACC (2001) y fibra dietética por el método Dumas bajo las condiciones del método 962.09 AOAC (Vol. II, AOAC, 1995b). El contenido de los hidratos de carbono se obtuvo por



diferencia de porcentajes de todos los constituyentes anteriormente determinados, con respecto al cien por ciento.

Para las determinaciones de metales en las muestras se realizó una digestión de cada una, en un equipo de microondas Mars-X que consta de un carrusel de 14 vasos de teflón, con sus respectivas tapas, control de temperatura y control de presión; para la cual, se pesó 0.2 g de muestra en cada vaso de teflón (se realizan por triplicado) y se adicionan 5 ml de ácido nítrico concentrado, se colocan en el microondas aplicando el método cebada-2, que consta de 3 etapas según el control de temperatura o de presión. Una primera etapa para elevar la presión gradualmente hasta 300 PSI por espacio de 10 minutos, una segunda etapa para mantener la presión (300 PSI) constantes durante 10 minutos todo a una potencia de 1200 W y finalmente 5 minutos de enfriamiento. Posteriormente las muestras son filtradas y aforadas a 50 ml con agua desionizada.

El análisis de los elementos metálicos en las diferentes muestras se realizó en un espectrofotómetro secuencial de plasma acoplado inductivamente (ICP) con bomba peristáltica controlada por computadora, con un flujo de 0.5-2.0 ml·min⁻¹ y nebulizador tipo Grid. Las curvas de calibración para cada elemento se prepararán a partir de estándares unielementales y/o multielementales.

V.6.1. Análisis de Humedad.

Los contenidos de humedad fueron determinados por el método gravimétrico que se establece para cereales y granos (AOAC, Vol. II, 1995 b). Los almidones nativos y modificados que se utilicen para estas determinaciones se degradan y son desechados.

Esta prueba se basa en la pérdida de agua que sufrió la muestra al ser calentada hasta peso constante. El método utilizado fue el 925.10 de la AOAC (Vol. II, 1995 b). Para la medición, se utilizaron charolas de aluminio previamente puestas a peso constante. Se pesaron 3 g de la muestra, la cual fue calentada 130°C ± 2°C en una estufa por 16 hr. Transcurrido este tiempo las charolas se enfriaron temperatura ambiente en un desecador hasta peso constante y fueron pesadas. El porcentaje de humedad se calculó bajo la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P_1 - P_2}{m} \times 100 \quad (\text{Ec. 16})$$

donde:

P₁ = peso de la charola con muestra antes de ser secada (g)

P₂ = peso de la charola con muestra después de secada (g)

m = peso de la muestra (g)



V.6.2. Determinación de cenizas

Los contenidos de ceniza de manera análoga a la humedad se determinan por el método de sequedad, incineración, y gravimetría (AOAC, Vol. I, 1995 a), tal y como se establece para cereales y granos. También se desechan estas muestras.

El material mineral se cuantificó incinerado la muestra hasta la obtención de un residuo inorgánico correspondiente a la fracción de las cenizas de la muestra. Se determinó de acuerdo al método 923.03 de la AOAC (Vol. I, 1995 a) a partir de 3 g de muestra incinerada en una mufla Fisher Scientific a una temperatura de 550°C hasta que se obtuvieron cenizas color gris blancuzco o blanco uniforme sin que se presentaran manchas negras. Los crisoles se dejaron enfriar en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente. Con la siguiente fórmula se determinó el contenido de cenizas:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{P_1 - P_2}{m} \times 100 \quad (\text{Ec.17})$$

donde:

P₁ = peso del crisol con muestra después de la incineración (g)

P₂ = peso del crisol a peso constante (g)

m = peso de la muestra (g)

V.6.3. Determinación de grasas

El análisis de grasas se realizó en un equipo para extracción de grasas marca LECO TFE 2000, en el que se utilizó CO₂ supercrítico con una presión de 9000 psi. Se pesaron 0.20g de muestra seca y se llevaron al equipo.

V.6.4. Determinación de proteínas

La determinación de Proteínas y Nitrógeno se realizó mediante el método de Dumas (AOAC, Vol. II, 1995 b) en un equipo LECO FP-528, el cual consta de una cámara de oxígeno donde se lleva a cabo una combustión a 850°C, una celda de termoconductividad y un microprocesador en donde se realizan los cálculos y se controlan los parámetros operativos.

Como gas de transporte se usa Helio, para el control de la presión se usa aire comprimido y oxígeno para la combustión.

V.6.5. Determinación de fibras

El contenido de fibras totales o fibra bruta y contenido de fibras solubles e insolubles (AOAC, Vol. II, 1995 b). Para la determinación de fibra fue necesario con las muestras desengrasadas. La determinación se llevó a cabo bajo las condiciones del método 962.09 AOAC (Vol. II, 1995 b). Con este método se determinó como fibra dietética total, la pérdida de peso por incineración que experimentó el residuo seco remanente después de la digestión de la muestra en



un equipo de digestión, con soluciones de H_2SO_4 al 1.25% y NaOH al 1.25%. La fórmula utilizada para obtener el porcentaje de fibra fue la siguiente:

$$\% \text{ Fibra} = \frac{P_1 - P_2}{m} \times 100 \quad (\text{Ec. 18})$$

donde:

P_1 = peso del crisol con residuo después del secado (g)

P_2 = peso del crisol con residuo después del calcinado (g)

m = peso de la muestra (g)

V.6.6. Determinación de carbohidratos

La determinación de carbohidratos se realizó por cálculo con base a lo propuesto por Blanco y colaboradores (Blanco *et al.*, 2000), quienes establecen que la sumatoria de los parámetros de humedad, cenizas, grasas, fibras y proteínas, restada de cien (100), es equivalente al porcentaje de carbohidratos totales en la muestra del cultivo u órgano del mismo. De acuerdo con esto se empleó para el cálculo la expresión:

$$\% CH = \sum (\% H_2O + \% \text{Cenizas} + \% \text{Fibra} + \% \text{grasa} + \% \text{proteínas}) \quad (\text{Ec. 19})$$

V.6.7. Poder de germinación

El poder germinativo se realizó según la NMX-FF-043-SCFI-2003, considerando éste como la aptitud del grano para iniciar el desarrollo de su embrión. Se utilizó el método de tinción con tetrazolio en tubos de ensayo. Para esta determinación se cuentan al azar 50 granos sanos y se cortan longitudinalmente procurando no dañar el embrión y se colocan en un tubo de ensayo. Se cubre la muestra con solución de tetrazolio (cloruro de 2,3,5 trifenil tetrazolio) al 1% para que empiece a efectuarse la reacción.

Se trata de una reacción indicadora que se realiza en un baño de agua a temperatura de 45°C para ahorrar tiempo y acelerar la reacción de aparición de un color un rojo rosa a rojo intenso. El tiempo de reacción bajo estas condiciones es de 8 minutos mínimo a 15 minutos máximo. Si se realiza a temperatura ambiente puede esperarse 30 minutos como mínimo. Cuando el tiempo de reacción ha terminado, se separan los granos empleando un pequeño colador; se lavan en el mismo colador inmediatamente con agua limpia. Si el embrión presenta una coloración rojo intensa en las estructuras de crecimiento es indicativo de que el embrión está vivo y presenta una gran viabilidad; la falta de coloración y/o colores rosa pálidos, indican la muerte del embrión o poca viabilidad, respectivamente. Para cuantificar el porcentaje de germinación, se determinan los granos vivos (por conteo) y la cifra se multiplica por dos que representa el porcentaje de viabilidad para la germinación. Se realizó un estudio comparativo entre métodos germinativos establecidos como variantes en la NMX-FF-043-SCFI-2003 (método del ácido sulfúrico y método del peróxido de hidrógeno) y los métodos colorimétricos (tetrazolio e índigo carmín) (Benito *et al.*, 2004).



V.6.8. Análisis de metales

Todas las muestras de suelo, de cultivos colectados en campo o sembrados en macetas y de aguas lixiviadas, fueron previamente digeridas con HNO_3 en horno de microonda.

Para las determinaciones de metales en las muestras de suelos, los mismos se vaciaron en tamices Tyler para obtener partículas menores a 100 micras. Posteriormente se realizó una digestión en un equipo de microondas Mars-X para lo cual, se pesó 0.2 g de muestra de suelo y se adicionaron 5 ml de ácido nítrico concentrado, se colocaron en el microondas aplicando el método s_cebada-2, que consta de 3 etapas según el control de temperatura o de presión. Una primera etapa para elevar la presión gradualmente hasta 300 PSI por espacio de 10 minutos, una segunda etapa para mantener la presión (300 PSI) constantes durante 10 minutos todo a una potencia de 1200 W y finalmente 5 minutos de enfriamiento. Posteriormente las muestras fueron filtradas y aforadas a 50 ml con agua desionizada. Se reservaron para las determinaciones de metales. Estas últimas se realizaron por espectroscopía de emisión atómica con plasma acoplada inductivamente (ICP). Se realizaron en un equipo Perkim Helmer, modelo Optima 3000. Todas las determinaciones y análisis se realizaron por triplicado.

Por cada una de las etapas de crecimiento y desarrollo de la planta (5 etapas), derivadas de los ensayos en maceta, se tomaron una de cada una de las cinco réplicas del cultivo, comenzando a partir de la formación del coleoptilo-primer hoja. Se separaron en cada una de sus partes, y fueron secadas, trituradas y digeridas, de forma similar a la explicada para la realización de los análisis de bioacumulación de los metales, por cada una de las partes (raíz, tallo, hoja, espiga y grano). De igual forma se procedió con los cultivos recolectados en campo y fueron medidas las concentraciones de metales por ICP.

V.7. Establecimiento del uso de indicadores e índices para evaluación rápida de calidad de los suelos cebaderos del sur del estado de Hidalgo.

Se proponen como indicadores para evaluaciones rápidas de calidad de los suelos cebaderos los siguientes parámetros:

- pH
- Carbono orgánico
- Porcentaje de saturación de bases
- Porcentaje de agregados estables en agua (>0.5 mm).
- Velocidad de infiltración
- Densidad aparente
- Potencial Zeta pZ
- Espesor del Horizonte A

La determinación del pH de los suelos, fue medido por potenciometría (relación suelo-agua 1:2), según se indicó en el apartado V.4.1; el contenido de carbono



orgánico se determinó por el método de Walkley *et* Black (Jackson, 1987), según se indicó en el apartado V.4.6; la saturación de bases por el método del acetato de amonio (Castellanos *et al.*, 2000); el porcentaje de agregados estables en agua (>0,5 mm) según Pla Sentis (1983); la velocidad de infiltración usando el método del doble anillo (ASTM D 3385-88) y la densidad aparente por el método del cilindro (Blake *et* Hartge, 1986). El espesor horizonte A fue valorado a campo (Soil Survey Staff, 2006).

La metodología de indicadores tiene como condición esencial el apoyarse en una base cartográfica para que a partir de ella sea factible el análisis en el espacio y en el tiempo. En este caso la cartografía de base se realizó utilizando la combinación de diversos tipos de mapas (geomorfológico, hidrológico, suelos y uso del suelo) de los municipios de Apan, Almoloya y Emiliano Zapata.

V.8. Establecimiento del uso de indicadores e índices para evaluación rápida de calidad del cultivo de cebada maltera (ICCM) del sur del estado de Hidalgo.

La calidad de la cebada maltera está definida principalmente por la calidad en su composición química del grano, destinado para la elaboración de malta, y de la variedad en particular. Las cebadas cerveceras o malteras requieren de una gran regularidad en la germinación, bajo nivel de proteínas y alto poder diastásico. Desde el punto de vista del rendimiento por hectárea, un parámetro importante podría resultar la densidad del grano en términos de peso hectolitro (PHL) expresado en kg/HL; este parámetro suele variar dependiendo de las variedades entre 65-78 kh/HL (López *et al.*, 2005).

Por otra parte, en la tabla III.2 se indicaron los parámetros de calidad promedio por cada 100 gramos de granos de cebada. Así por ejemplo, el contenido de nitrógeno proteico para la calidad maltera debe oscilar entre 8 y 12 %; la materia grasa deberá ser menor de 2.0 %, la humedad del grano entre 6 y 15 % y el contenido en fibras totales entre 2 y 8 %.

Se proponen como indicadores para evaluaciones rápidas de calidad del cultivo de cebada maltera los siguientes parámetros:

- Humedad en el grano al momento de la cosecha
- Densidad por peso hectolítrico
- Porcentaje de materia grasa
- Nitrógeno proteico (expresado como proteínas)
- Porcentaje en fibras totales
- Porcentaje de cenizas

La determinación de humedad total en granos al momento de la cosecha (recolecta del grano), se realizó por el método gravimétrico (AOAC, Vol. II, 1995 b); la densidad por peso hectolítrico de acuerdo con la metodología descrita por la norma mexicana NMX-FF-043-SCFI-2003; el porcentaje de materias grasas se



realizó en un equipo para extracción de grasas marca LECO TFE 2000, en el que se utilizó CO₂ supercrítico con una presión de 9000 psi, como se describió en el apartado V.6.3. El nitrógeno proteico mediante el método de Dumas (AOAC, Vol. II, 1995 b) en un equipo LECO FP-528, según se describió en el apartado V.6.4. La determinación de fibras se llevó a cabo bajo las condiciones del método 962.09 AOAC (Vol. II, 1995 b), determinándose como fibra dietética total, y finalmente los porcentajes de cenizas, asociados a los contenidos en óxidos metálicos absorbidos en el grano, se determinaron por el método de sequedad, incineración, y gravimetría (AOAC, Vol. I, 1995 a).

V.9. Análisis estadísticos y correlación de resultados.

Para todo los ensayos y resultados obtenidos, se valoraron los criterios estadísticos de medias y porcentaje de desviación estándar (%DRE) o de coeficiente de variación (%CV), considerándose que todos los valores de % DRE o %CV < 10 fueron aceptables. Se utilizó el paquete estadístico SPSS, versión 17 para Windows (SPSS, 2008) para establecer criterios y correlaciones de correspondencias entre los datos obtenidos y las posibles causas-efectos entre los parámetros que fueron evaluados.

V.10. Bibliografía

- AACC. (2001). Approved Methods of American Association of Cereal Chemists. 10 Th edition. Vol. II. Method 42-10.
- Álvarez, R and H Steinbach. (2006). Valor agronómico de la materia orgánica. Pp. 13-29 En: Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Ed. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- AOAC. 1995 a. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist. Volumen I. Edited by Kenneth Herlich. p. 78-79, 237, 247, 272.
- AOAC. 1995 b. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist. Volumen II. Edited by Kenneth Herlich. p. 777-778, 1110.
- ASTM. Annual Book of Standards. (1993). ASTM D 3385 - 88. Section 4 Construction. Volume 04.08: Soil and Rock, Dimension Stone; Geosynthetics. Pp. 452-458.
- Benito, L. F.; Herrero, N.; Jiménez, I.; Peñuelas, J. R. (2004). Aplicación de métodos colorimétricos para la determinación de la viabilidad em semillas de *Pinus pínnea*: test Del tetrazolio y el índigo carmín. Cuad. Soc. Esp. Cien. For. 17:23-28.
- Blake, GR & KH Hartge. (1986). Bulk density. Pp. 363-375. In: A Klute (ed.). Methods of Soil Analysis. Part 1. Agronomy Monograph N° 9. Am. Soc. Agron. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Blanco, M. A.; Montero, M de los A.; Fernández, M. (2000). Composición química de productos alimenticios derivados de trigo y maíz elaborados en



- Costa Rica. Revista Archivos Latinoamericanos de Nutrición. ALAN. Vol. 50, N° 1, Caracas, Venezuela. p.62-74.
- Boulding JR. (1995). Description and sampling of contaminated soils. A field guide, 2nd ed. Boca Raton, FL7 Lewis Publishers; Chapter 3.
 - Brye KR & NA Slaton. (2003). Carbon and Nitrogen storage in a typic Albaqualf as affected by assessment method. *Comm in Soil Sc. and Plant Anal.* 34: 1637-1655.
 - Buduba, C. (2006). Modificaciones en el pH y contenido de materia orgánica en suelos del ecotono estepa/bosque andino patagónico por implantación de pino ponderosa. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
 - Carreira, D. (2005). Carbono oxidable. Una forma de medir la materia orgánica del suelo. Pp. 91-102. En: L Marbán & S Ratto (eds.). *Tecnologías en análisis de suelos.* Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
 - Castellanos, J.; Uvalle, J.; Aguilar, A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos. 2da Edición. Editorial Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. Colección INCAPA. p. 14, 37-39, 102-136.
 - Certini, G.; Corti, G.; Fernández, S. (2002a). Comparison of two soil organic matter extractants and determination of the «Walkley-Black» correction factors for organic fractions from a volcanic soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 685-693.
 - Certini, G; G Corti & M Fernández Sanjurjo. (2002b). Comparison of two soil organic matter extractants and determination of the «Walkley-Black» correction factors for organic fractions from a volcanic soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 685-693.
 - Davel, M and A Ortega. (2003). Estimación del índice de sitio para pino oregón a partir de variables ambientales en la Patagonia Andina Argentina. *Bosque* 24: 55-69.
 - Davies, B. (1974). Loss-on ignition as an estimate of soil organic matter. *Soil Sci. Proc.* 38: 150.
 - De Vos, B; B Vandecasteele; J Deckers and B Muys. (2005). Capability of Loss-on-Ignition as a Predictor of Total Organic Carbon in Non-Calcareous Forest Soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 2899-2921.
 - Jackson P.J. (1987). Poly (γ -glutamylcysteinyl) glycine: Its role in cadmium resistance in plant cells, *Proc. Natl. Aca. Sci.*, 84, 6619-6623.
 - La Manna, L; V Alonso; C Buduba; M Davel; C Puentes and J Irisarri. (2007). Contenido de materia orgánica del suelo en la Región Andino Patagónica: comparación entre métodos analíticos. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Salta y Jujuy, Argentina.
 - Labrador Moreno, J. (1996). La materia orgánica en los agrosistemas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Mundi-Prensa, Madrid. 174 pp.
 - Lettens, S; B De Vos; P Quataert; B Van Wesemael; B Muys and J Van Orshoven. (2007). Variable carbon recovery of Walkley-Black analysis and implications for national soil organic carbon accounting. *Eur J of S Sci.* 1365-2389.



- López-Perea P., Guzmán-Ortiz F. A., Santos-López E. M., Prieto-García F. y Román-Gutiérrez A. D. (2005). Evaluación de la calidad física de diferentes variedades de cebada (*Hordeum Hordeum distichum L.*) cultivadas en los estados de Hidalgo y Tlaxcala, México. *Revista Chilena de Nutrición*. Vol. 32 (3). p. 247-253.
- Malvern Instrument, Inc. (2004). Potencial Zeta. Un curso completo en cinco minutos. Ed. Malver Inst. Catálogo Zeta-Meter. Westborough, MA 01581-1042, USA.
- Münch, L., E. Angeles. (1998). Métodos y técnicas de investigación. 2a ed. Ed. Trillas, México, 99-114.
- Norma Oficial Mexicana. (2000). NOM-021-RECNAT-2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial de la Federación del 14 de febrero de 2001. p. 17.
- Norma Mexicana NMX-FF-043-SCFI-2003. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano -cereal- cebada maltera (*Hordeum vulgare L.* y *Hordeum distichum L.*). Especificaciones y métodos de prueba.
- Pla Sentís, I. (1983). Metodología para la Caracterización Física con fines de Diagnóstico de Problemas de Manejo y Conservación de Suelos en Condiciones Tropicales. *Revista Alcance* N° 32:96.
- Rosell, RA; JC Gasparoni and JA Galantini. (2001). Soil organic matter evaluation. Pp. 311-322. En: R Lal; J Kimble; R Follett & B Stewart (eds.). *Assessment Methods for Soil Carbon*. Lewis Publishers, USA.
- Soil Survey Staff. (2006). Key to Soil Taxonomy. USDA Tenth Edition. Washington DC. 341 pp.
- SPSS. (2008). Statistics. Version 17.0. Base system plus Logistic Regression, General Linear Models, and Linear Mixed Models. Chicago. United States of America.
- Tamayo, L., M. Tamayo. (1998). El proceso de la investigación científica. 3a Edición. Ed. Limusa. México DF, México, 44-49.
- USDA-NRCS. (1999). Soil Quality Test Kit. Section II: Background and interpretive guide for individual tests. Washington DC: Soil Quality Institute.

Sitios de internet

- <http://www.inforganic.com/node/2008>.
- <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/hidalgo/municipios/2010>.



VI. Resultados y discusión.

Para facilitar la comprensión de este capítulo se ha dividido en diez partes, comenzando por los resultados de la caracterización de suelos, y el establecimiento y evaluación de indicadores e índices de calidad para suelos cebaderos, a partir de la cuarta parte de este capítulo se describen los ensayos en maceta, la sexta parte abarca los análisis proximales por órganos de la planta cultivada en parcelas y por municipios del estado de Hidalgo, igualmente el establecimiento y evaluación de indicadores e índices de calidad del cultivo de cebada maltera (ICCM) para cebada cultivada en los municipios evaluados en el estado de Hidalgo, en la novena parte se hace un análisis de correlaciones estadísticas en suelos y en el cultivo de cebada; finalizando cada capítulo con sus respectivas conclusiones y finalmente la bibliografía utilizada.

VI.1. Resultados de los estudios de caracterización de suelos.

Las características como pH, potencial redox (Eh), contenidos de humedad, materia orgánica y composición elemental de los suelos analizados mostraron algunas semejanzas en las regiones cebaderas estudiadas.

La determinación del pH en los suelos en estudio, mostraron valores que los clasifican como neutros (NOM-021-SEMARNAT-2000; Boulding, 1995), con excepción de los suelos de Emiliano Zapata que llegan a clasificar como moderadamente ácidos. Estos valores de pH son característicos de zonas áridas y son favorables para el cultivo de cebada (ver tabla VI.1). Valores extremos de pH alcalinos pueden provocar precipitación de ciertos nutrientes, los que permanecen en los suelos en forma no asimilable para las plantas. También se puede modificar significativamente el pH del suelo mediante el riego, drenaje, uso de pesticidas y fertilizantes.

Los valores de potencial redox (Eh), que definen el carácter oxidante o reductor asociado a los suelos, indican que los suelos cebaderos evaluados resultaron ser poco reductores (tabla VI.1). De forma similar los valores de potencial zeta (pZ) en los extractos de saturación los muestran como suelos que presentan suspensiones coloidales de partículas de bajas a moderadamente estables; estos resultados y criterios de clasificación se reportan por primera vez para estos suelos dedicados al cultivo de cebada maltera. Se muestra en la figura VI.1 las correlaciones y correspondencias entre los valores de pH - Eh - pZ.

La estabilidad del suelo sirve como un indicador cualitativo de la actividad biológica, flujo de energía, y desarrollo del ciclo de nutrientes. La agregación de las partículas del suelo debe ser constantemente renovada por los procesos biológicos (USDA, 2000). Los suelos de Almoloya (pH=6.30) mostraron el valor más bajo de pZ; que implica mayor estabilidad de las fracciones coloidales en este suelo, es oportuno indicar que valores < -30 mV indican una elevada estabilidad en las fracciones coloidales en la fase líquida de los suelos (Malvern, 2004). En la figura VI.1 a y b se puede apreciar que se logran regresiones superiores a 0.60, a



pesar de tratarse de municipios diferentes, esta regresión indica una tendencia similar en los tres municipios, que supera el 50 %, tal vez por tratarse de suelos que han sido dedicados por más de cuarenta años a un monocultivo (cebada).

Tabla VI.1. pH, potencial redox (Eh) y potencial Zeta (pZ) en extractos de saturación de los suelos en estudio. (desviación estándar).

Municipio	VALORES PROMEDIOS (Iniciales)		
	pH	Eh (mV)	pZ (mV)
Almoloya	6.30 (0.081) ^a	-19.84 (1.707) ^a	-25.24 (0.763) ^a
Apan	6.80 (0.076) ^b	-29.99 (2.646) ^b	-20.99 (0.638) ^b
E. Zapata	6.76 (0.038) ^b	-28.59 (2.111) ^b	-18.73 (0.514) ^c

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

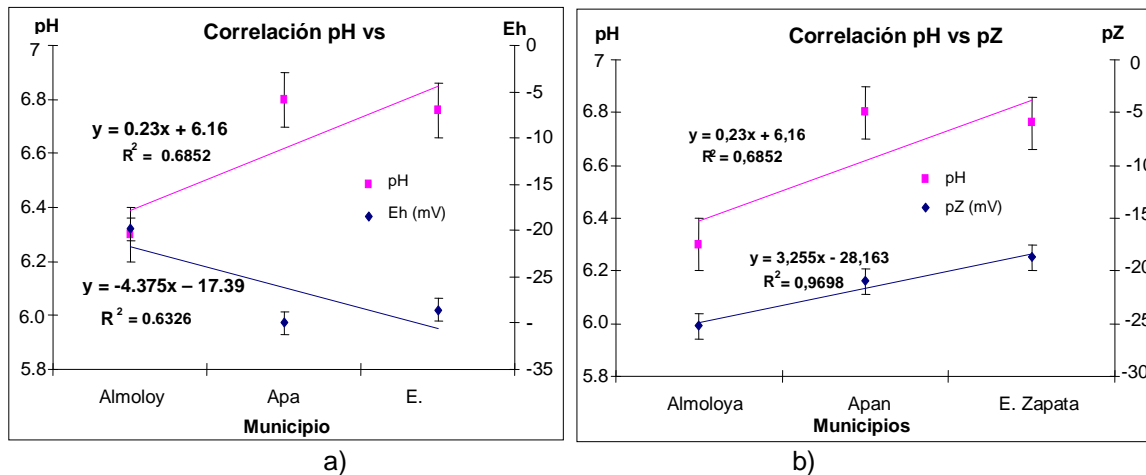


Figura VI.1. Correlaciones entre valores promedios de a) pH y Eh y b) pH y pZ.

La figura VI.2 por su parte, muestra las variaciones del pZ a diferentes pH que se fueron cambiando en los extractos de saturación para valorar la estabilidad de sus suspensiones coloidales a diferentes pH. Es apreciable que los suelos de Apan y Emiliano Zapata, manifiestan una cierta inestabilidad de las fracciones coloidales a pH próximos a la neutralidad ($pH=7.5$).

Esto se asocia a los mayores contenidos de sales disueltas (salinidad) en estos suelos, coincide con lo reportado por Galantini *et* Suñer, 2008 y Quiroga y colaboradores, 2001.

Un suelo salino es aquel que posee una elevada cantidad de sales solubles. También se encuentran en el suelo sales insolubles las cuales precipitan y no causan problemas para las plantas. Las sales solubles principales son cloruro y sulfato de sodio, magnesio, carbonatos de sodio y calcio. Los suelos salinos se encuentran en zonas de climas áridos y secos, en los que la evaporación es mayor que la precipitación. La salinidad de los suelos puede producirse por varias causas; por ejemplo, a partir del propio material original de algunas rocas (de tipo sedimentarias), que tienen sales minerales constituyentes solubilizables, (Galantini *et* Rosell, 2006).

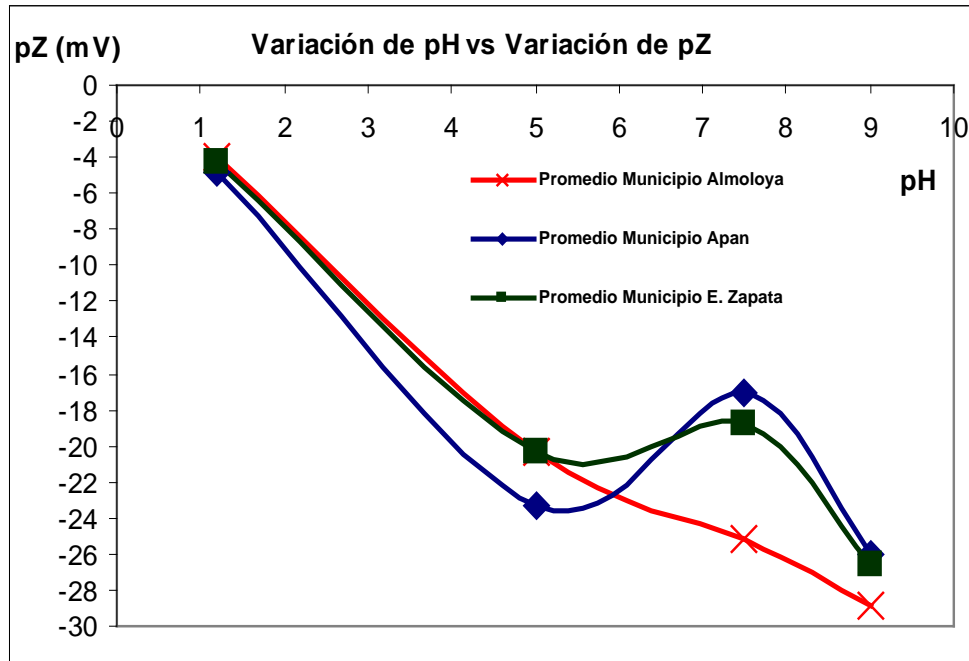


Figura VI.2. Variaciones del pZ a diferentes pH de los extractos de saturación de suelos.

En otros casos, el material original no contiene estas sales, pero pueden aparecer en el suelo debido a la alteración de los minerales originales de la roca madre. Resulta importante determinar o medir la salinidad del suelo, lo cual se realiza en el extracto de saturación suelo-agua 1:1. (Núñez, 1992). En la tabla VI.2 se muestran los valores promedios obtenidos en los suelos de los municipios en evaluación. Se clasifican como suelos No Salinos (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Estos resultados, corresponden con suelos de bajas concentraciones de sales disueltas en la fase acuosa y siendo los suelos menos salinos del municipio de Almoloya. En la figura VI.3.a se aprecia una buena correlación entre las variaciones de pH y CE en los diferentes suelos.

Tabla VI.2. pH, Conductividad eléctrica (CE) y porcentaje de humedad de los suelos en estudio. (desviación estándar).

Municipio	VALORES PROMEDIOS (Iniciales)		
	pH promedio	Conduct dS/cm	Humedad (%)
Almoloya	6.30 (0.081) ^a	0.24 (0.015) ^a	8.20 (0.191) ^a
Apan	6.80 (0.076) ^b	0.29 (0.017) ^b	10.20 (0.124) ^b
E. Zapata	6.76 (0.038) ^b	0.35 (0.029) ^c	6.95 (0.173) ^c

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

Los contenidos de humedad de todos los suelos resultaron ser de moderados a bajos (menores de 10%) corresponde a suelos con relativos bajos contenidos en arcillas (<60%) y de materia orgánica (MO) que podrían indicar bajos contenidos de ácidos húmicos y fúlvicos; y en consecuencia sus capacidades para retener el agua (CRA) son bajas.

La figura VI.3.b pone de manifiesto que no existe correlación alguna entre los contenidos de agua (humedad) retenida en los suelos y los pH de sus extractos de saturación.

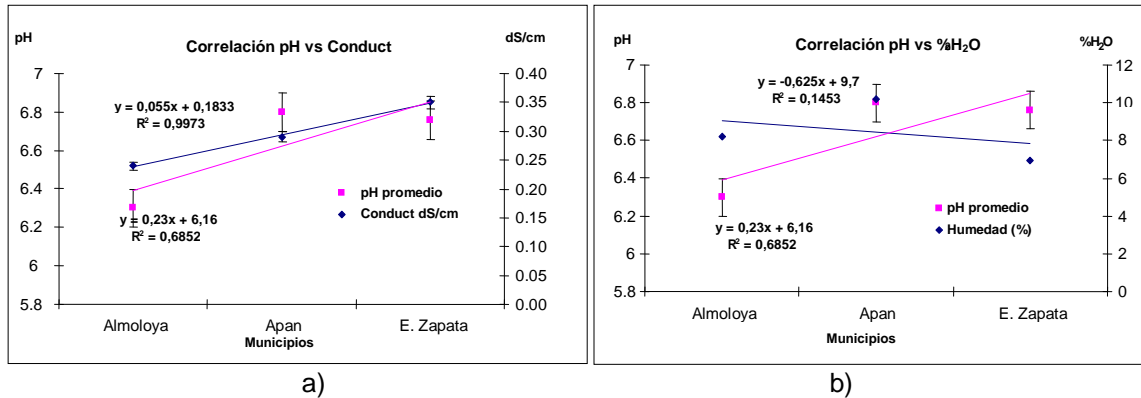


Figura VI.3. Variaciones de a) pH y Conductividad eléctrica (CE) y b) pH y % H₂O en suelos.

En efecto se pudo corroborar que los suelos clasifican como franco arcillosos a excepción de los suelos del municipio de Emiliano Zapata (franco arenoso) por lo cual presentó los contenidos más bajos de humedad (tabla VI.3). A su vez para los suelos de Emiliano Zapata, se pudo comprobar los más bajos contenidos de MO por análisis realizados por los métodos del dicromato y permanganato de potasio, respectivamente (tabla VI.4). En esta tabla VI.4 se aprecia que los suelos de Apan muestran los valores altos de MO, correspondiendo perfectamente con los suelos con mayor contenido de arcilla y más capacidad de retención de humedad. Le siguen en orden descendente los suelos de Almoloya y finalmente los suelos de Emiliano Zapata.

Tabla VI.3. Texturas de los suelos de los municipios en estudio. (desviación estándar).

Municipio	VALORES PROMEDIOS			
	Textura	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)
Almoloya	fr-arcill-aren	16.94 (1.24) ^a	54.39 (1.96) ^a	28.67 (2.21) ^a
Apan	fr-arcill-aren	22.17 (1.88) ^b	55.17 (1.50) ^a	22.67 (2.31) ^b
E. Zapata	fr-arenoso	62.83 (2.33) ^c	12.50 (1.63) ^b	24.67 (2.63) ^b

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (p<0.05)

Es importante destacar que en la tabla VI.4, se muestra en la última columna la relación entre los resultados encontrados por ambos métodos (Relación Permanganato/Dicromato); se aprecia una relación que varía entre 0.25-0.35. Como han definido algunos autores (Rosell *et al.*, 2001), el método del permanganato de potasio fundamentalmente determina la MO que está disponible en los extractos coloidales de la fase acuosa de los suelos (Rosell *et al.*, 2001). De acuerdo con los resultados que se obtuvieron se puede asumir por tanto que de los contenidos totales de MO en estos suelos, entre el 25 y el 34 % corresponde a contenidos de MO disponible, lo cual indica contenidos muy bajos o suelos pobres en MO disponibles para este cultivo.

Tabla VI.4. Materia orgánica (MO) de los suelos en estudio. Comparación del método del dicromato y el método del permanganato de potasio. (desviación estándar)

Municipio	MO	% MO		Relac Perm/Dicrom
	Clasificación	Dicromato	Permanganato	
Almoloya	Medio	6.34 (0.21) ^a	1.81 (0.09) ^a	0.28 ^a
Apan	Medio	8.36 (0.33) ^b	2.12 (0.11) ^b	0.25 ^a
E. Zapata	Bajo	4.97 (0.20) ^c	1.68 (0.09) ^a	0.34 ^b

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (p<0.05)



También se ha podido encontrar una relación directa entre estos contenidos de MO y las capacidades de intercambio catiónico (CIC). En la tabla VI.5 se muestran los valores promedios encontrados.

Suelos con contenidos mayores de arcilla y de materia orgánica (MO), corresponden con mayor capacidad de intercambio catiónico (CIC); en este caso los suelos del municipio Apan, seguidos de los suelos del municipio Almoloya y por último los suelos del municipio Emiliano Zapata. Esto es observable a partir de los valores que se tienen en la tabla VI.5. Según Pierzynski y colaboradores (1994) esto es explicado por las capacidades propias de las arcillas para el intercambio catiónico, es por ello que a mayores contenidos de arcillas debe corresponder una mayor CIC y en correspondencia con valores de pH alcalinos en suelos.

Tabla VI.5. Materia orgánica (MO) de los suelos en estudio (método del permanganato de potasio) y capacidad de intercambio catiónico (CIC). (desviación estándar)

Municipio	MO	CIC
	%	cmol/kg
Almoloya	1.81 (0.09) ^a	10.53 (1.03) ^a
Apan	2.12 (0.11) ^b	13.42 (1.09) ^b
E. Zapata	1.68 (0.09) ^a	6.85 (0.57) ^c

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

Los suelos del municipio de Emiliano Zapata son los que mostraron los menores contenidos de MO y CIC, esto también puede estar asociado a que estos suelos son lo que presentan menores porcentajes de arcilla. Esto puede explicarse y entenderse partiendo de los resultados de los análisis de metales en los suelos. En la tabla VI.6. se muestran los resultados de concentraciones de metales iniciales encontrados en estos y su correspondencia con los contenidos porcentuales de cenizas, la cual se corrobora de manera gráfica en la figura VI.4.

En la tabla VI.6. se aprecia que los mayores porcentajes de cenizas se corresponden con los suelos de Emiliano Zapata, lo cual está en concordancia con los resultados de texturas (mayores contenidos de arena, menor capacidad de retención de agua, menor CIC y menores contenidos de MO). Así mismo se puede constatar que se cumple la proporción entre la suma de metales en los suelos (mg/Kg) con los porcentajes de cenizas. Las cenizas están asociadas a los contenidos de óxidos metálicos, luego de la combustión de toda la MO y descomposición de los carbonatos y bicarbonatos.

Tabla VI.6. Metales de los suelos en estudio y porcentajes de cenizas. (desviación estándar).

Municipio	Cenizas (%)	Na (mg/Kg)	K (mg/Kg)	Ca (mg/Kg)	Mg (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)
Almoloya	67.00 (0.45) ^a	27.19 (0.85) ^a	15.44 (0.83) ^a	46.77 (0.32) ^a	4.79 (0.06) ^a	0.89 (0.02) ^a	0.24 (0.01) ^a
Apan	62.55 (0.87) ^a	30.95 (0.61) ^a	17.34 (0.38) ^a	34.54 (0.91) ^b	6.27 (0.18) ^b	0.63 (0.07) ^b	0.25 (0.01) ^a
E. Zapata	75.04 (1.20) ^b	26.55 (0.71) ^a	1.28 (0.07) ^b	69.27 (1.82) ^c	3.68 (0.27) ^c	1.04 (0.09) ^c	0.42 (0.01) ^b

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

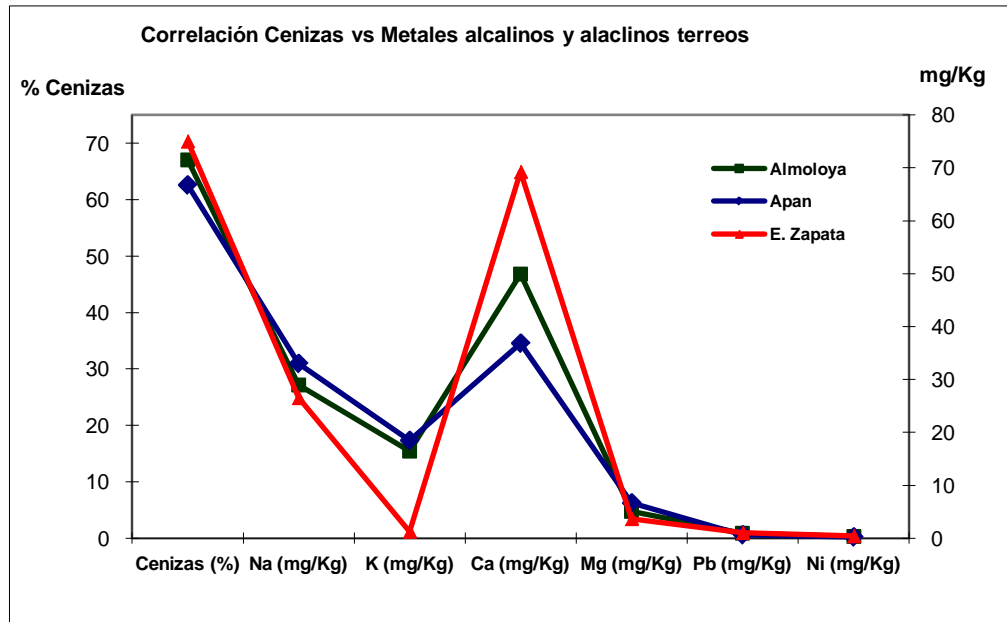


Figura VI.4. Metales en suelos y su correspondencia con los contenidos porcentuales de cenizas.

Los suelos del municipio de Emiliano Zapata presentaron mayores concentraciones de calcio (Ca), lo que puede corresponder a la adición de cal agrícola realizada por los agricultores. También estos suelos resultan de menores contenidos de potasio (K) y mayores contenidos de plomo (Pb) y níquel (Ni). En función de sus bajos contenidos en K y su desproporción con respecto al sodio (Na), también observable entre Ca y magnesio (Mg), (tabla VI.7., resaltado en negritas), se puede explicar la baja CIC. La absorción de minerales por las plantas desde el suelo, está relacionada a la concentración de cationes, que por competencia iónica se absorben con mayor facilidad y velocidad los que tienen sola una carga positiva, que los que tienen mayor cantidad (Rodríguez, 1992). Para el caso particular del suelo de Emiliano Zapata debido al uso de encalado es mayor la absorción de calcio que está disponible, que la del potasio e incluso la del magnesio que se encuentra en bajas concentraciones.

Todos los suelos agrícolas contienen calcio procedente de las rocas originarias, dominando entre los demás cationes. La mayor o menor cantidad se refleja en el grado de saturación de la arcilla, cuyo indicador es el pH del terreno (Gutiérrez, 1995) y también las prácticas agrícolas.

El calcio forma sales con los ácidos orgánicos e inorgánicos del interior de las células regulando la presión osmótica de la misma. Igualmente actúa en la división mitótica de las células, ha sido grandemente asociado con la regulación de los procesos de maduración de frutos y vida de almacenamiento post-cosecha. (Rodríguez, 1992).

En la tabla VI.7 se pueden apreciar algunas de las relaciones interesantes de estos suelos.



Tabla VI.7. Relaciones de concentraciones promedios de cationes intercambiables, asociados a los valores de CIC.

Municipio	Relac Na ⁺ /K ⁺	Relac Ca ²⁺ /Mg ²⁺	Relac Na ⁺ /Mg ²⁺	Relac Na ⁺ /Ca ²⁺
Almoloya	1.76 ^a	9.76 ^a	5.67 ^a	0.58 ^a
Apan	1.79 ^a	5.51 ^b	4.94 ^b	0.90 ^b
E. Zapata	20.83 ^b	18.84 ^c	7.22 ^c	0.38 ^c

Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (p<0.05)

Gráficamente (figura VI.5) se demuestra que la relación Na⁺/K⁺ de 20.8 para los suelos de Emiliano Zapata (el valor más elevado) se corresponde a los valores más bajos de CIC. Este valor de relación Na⁺/K⁺ tan elevado está básicamente sustentado por los contenidos extremadamente bajos de K⁺ en estos suelos (EZ), así como la relación Ca²⁺/Mg²⁺ por los niveles elevados de Ca²⁺.

El K sirve para regular el potencial osmótico celular, en algunas plantas; esta función puede ser reemplazada por otros cationes como el sodio (Na), pero siempre de una forma restringida, que no provoque efectos tóxicos (Rodríguez, 1992), lo que al parecer ocurre en estos suelos y por la baja presencia de K.

También es interesante destacar las desproporciones Na⁺/Mg²⁺ y Na⁺/Ca²⁺, que para los suelos de Emiliano Zapata (EZ) resultan ser mayores y menores, respectivamente, comparada con los suelos de Apan y Almoloya.

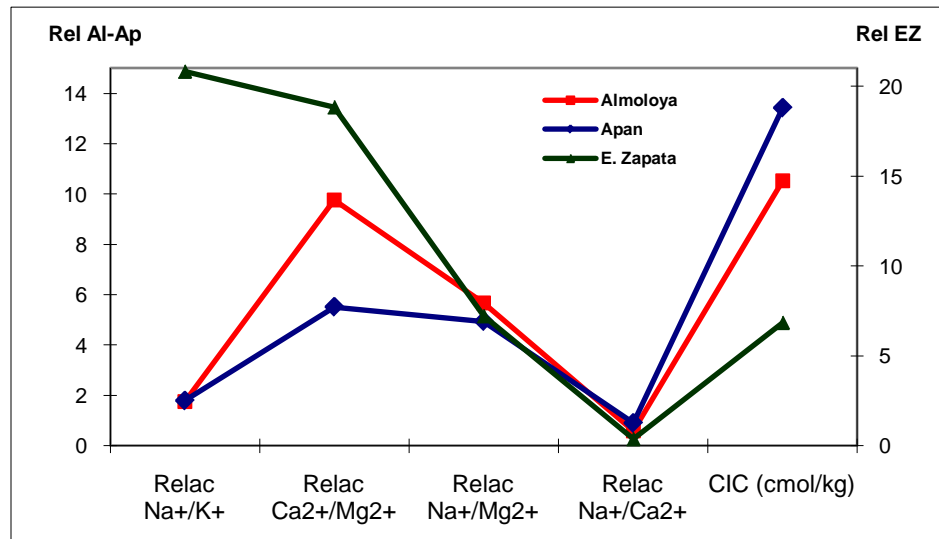


Figura VI.5. Correspondencia de los valores de relaciones entre metales y CIC para los diferentes suelos en estudio.

Esto está en correspondencia directa con las formas de manejo de estos suelos, su uso por más de cuarenta años en sistema de monocultivo, práctica de aplicaciones de fertilizantes y procesos de encalados. Todo ello conlleva a un deterioro de la calidad del suelo, que implica pérdidas de sus principales características, entre ellas, disminuciones de las porciones de arcilla y materia orgánica, y consecuentemente afectaciones a los rendimientos en el cultivo de cebada maltera y probables afectaciones a su calidad para estos fines.



Estudios realizados por otros autores han demostrado que otro factor importante está relacionado con la presencia de sales de calcio, magnesio y sodio en horizontes superficiales (Bonadeo *et al.*, 2001). Ello afecta, entre otras propiedades, las principales características del sistema de raíces (Bonadeo *et al.*, 2002). Esto es conocido como “manchoneo”, que es una problemática frecuente que aparece en los principales cultivos y pasturas de sectores con superficie variable, con límites bien definidos, y están caracterizados por un menor desarrollo de la parte aérea vegetal. Una de las características sobresalientes de este fenómeno es el abrupto cambio entre la superficie afectada y la no afectada, siendo las dimensiones de las áreas afectadas del orden de metros (Hampp *et al.*, 2004). Su manifestación es más intensa en áreas planas o ligeramente deprimidas, de relieve subnormal, donde los suelos poseen un mayor contenido de sales y/o Na intercambiable a diferentes profundidades (Bonadeo *et al.*, 2001, 2002), en comparación a los sectores más elevados. La sintomatología de las plantas afectadas por “manchoneo” se caracteriza por la disminución del tamaño de la planta, hojas más pequeñas, aunque pueden tener mayor espesor que aquellas de plantas normales, y a menudo de un verde más oscuro.

Los resultados de los análisis de metales en los suelos iniciales por fluorescencia de rayos x (FRX), se muestran en la tabla VI.8.

Tabla VI.8. Metales en suelos por FRX. Composición en óxidos básicos (%m/m), metales en estudio (mg/kg) y otros metales (mg/kg).

	Oxidos Básicos (%m/m)										
Almolya	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ Total	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PPC	SUMA
Media	61.02	16.61	4.91	1.21	3.54	0.12	2.50	1.14	0.16	7.43	91.13
desv est	0.15	0.06	0.01	0.06	0.54	0.01	0.05	0.02	0.01	0.04	0.55
%CV	0.24	0.37	0.35	5.16	15.24	4.68	1.89	1.75	3.69	0.47	0.60
Apan	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ Total	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PPC	SUMA
Media	58.81	18.48	5.33	1.80	3.69	0.09	2.74	1.32	0.17	6.633	92.377
desv est	0.07	0.15	0.06	0.04	0.04	0.00	0.04	0.02	0.01	0.234	0.106
%CV	0.12	0.82	1.03	2.00	1.03	0.00	1.59	1.15	3.33	3.53	0.11
E. Zapata	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ Total	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PPC	SUMA
media	60.43	18.30	4.46	1.34	3.86	0.08	3.20	1.27	0.11	5.91	93.00
desv est	0.27	0.17	0.12	0.04	0.08	0.01	0.07	0.02	0.01	0.08	0.39
%CV	0.45	0.92	2.64	2.63	1.94	6.93	2.19	1.57	9.09	1.39	0.42

	Metales en estudio (mg/kg) base seca				Otros metales (mg/kg) base seca					
Almolya	Pb	Ni	Cd	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Zn	SUMA TOTAL
Media	16.33	35.67	NR	15.62	500.33	15.33	90.67	22.33	72	91.90
desv est	1.16	1.16	NR	0.01	8.08	1.53	2.08	0.58	2	0.55
%CV	7.07	3.24	NR	0.04	1.62	9.96	2.30	2.59	2.78	0.60
Apan	Pb	Ni	Cd	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Zn	SUMA TOTAL
Media	13.67	35.67	NR	15.59	496.00	14.33	105.00	21.67	78.00	93.16
desv est	0.58	0.58	NR	0.00	2.65	1.53	9.54	0.58	2.00	0.09
%CV	4.22	1.62	NR	0.00	0.53	10.66	9.09	2.66	2.56	0.10
E. Zapata	Pb	Ni	Cd	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Zn	SUMA TOTAL
Media	15.67	34.00	NR	15.58	518.00	17.00	91.67	24.00	84.67	93.80
desv est	1.53	1.00	NR	0.01	3.61	1.00	3.51	1.00	1.53	0.39
%CV	9.75	2.94	NR	0.04	0.70	5.88	3.83	4.17	1.80	0.42

Nota: PPC, pérdidas por calcinación, equivalentes a MO; NR. No reportadas.

De la tabla anterior VI.8., se observa la correspondencia de los valores de pérdida por calcinación (PPC) con los contenidos de MO total encontrados por el método del dicromato (tabla VI.4). Los altos contenidos de SiO₂ corresponden con los contenidos de arena (tabla VI.3) y se observó también la correlación de los bajos



contenidos de K. Así mismo se pudo apreciar bajos contenidos de fósforo (P_2O_5); los bajos contenidos en los suelos de estos dos últimos elementos (K y P) indican las bajas condiciones de fertilidad de los mismos.

El K del suelo puede estar en forma sólida, fijado, intercambiable o soluble. Estas formas de potasio están siempre interrelacionadas y guardan un equilibrio constante entre ellas. El K soluble se encuentra en concentraciones que varían desde 1 hasta 265 ppm, con un rango de 2 a 5 ppm en los suelos de las regiones húmedas, mientras que en los suelos de zonas semiáridas y templadas dicha concentración va de 5 hasta 100 ppm, aunque el rango típico va de 8 a 25 ppm (Castellanos *et al.*, 2000).

El potasio es uno de los elementos esenciales de las plantas y participa en: la activación de muchas enzimas, las relaciones hídricas, la transpiración, las relaciones energéticas, la translocación de asimilados, la absorción de nitrógeno y la síntesis de proteínas y los sistemas de defensa de las plantas. El potasio no forma parte de la estructura de ninguna de las moléculas que se encuentran dentro de la célula de la planta. Tiene un papel muy importante en la calidad de varios cultivos como son algunas solanáceas, que son los cultivos de más alta demanda de este nutrimento, así como los cultivos cuya misión es la producción y almacenamiento de carbohidratos en los órganos de reserva o de fructificación, como es el caso de los cereales, en este estudio, la cebada.

Los suelos arcillosos presentan valores más altos de K que los suelos arenosos, sin embargo, este potasio es menos disponible en los primeros, por tal razón un suelo arenoso tiene un nivel crítico más bajo de K que un suelo arcilloso. A un mismo nivel de K intercambiable el suelo arenoso suministra momentáneamente más K a la solución del suelo. Otro factor a considerar en la disponibilidad de K es su contenido en el subsuelo, el cual también es utilizado por las plantas; esto es particularmente más importante para cultivos de raíz profunda como la mayoría de los cereales, el algodón y otros cultivos (Castellanos *et al.*, 2000).

Otros parámetros fisicoquímicos que fueron evaluados en los suelos de los tres municipios son, la densidad real y aparente, la capacidad de campo (C.C.), el porcentaje de agregados estables, las velocidades de infiltración, el porcentaje de saturación de bases y al espesor del horizonte A. En la tabla VI.9 se observan los resultados obtenidos.

Destacar en primera aproximación que la densidad aparente promedio de los suelos de los tres municipios fue de 1.09 Mg.m^{-3} . El menor valor correspondió a las parcelas del municipio de Emiliano Zapata (1.02 Mg.m^{-3}); este valor corresponde a suelos mas arenosos como se indicó anteriormente (Tabla VI.3.). Por otra parte la densidad real promedio de la región fue de 2.02 Mg.m^{-3} e igualmente el menor valor pertenece al municipio E. Zapata. Los valores de la densidad aparente permiten indicar que estos suelos no presentan problemas de consolidación ni compactación lo cual puede ser considerado como un parámetro óptimo para el buen desarrollo de las raíces e intercambio de gases sin problemas



de filtración. En cuanto a la densidad real, estos valores pueden ser indicativos de que predominen minerales ligeros (tipo plagioclasa y feldespatos).

Tabla VI.9. Otros parámetros medidos en los suelos en estudio.

	DENSIDAD REAL	DENSIDAD APARENTE	C.C.	A. ESTABLES	V. INFILT	SAT.BASES	ESPESOR HOR. A
APAN	Mg/m³	Mg/m³	%	%	cm/h	%	Cm
MEDIA	2.09	1.16	13.46	30.79	3.80	94.20	16.63
DESV EST	0.01	0.01	0.46	1.47	0.16	1.22	2.27
%CV	0.66	0.66	3.41	4.77	4.30	1.29	13.62
ALMOL	Mg/m³	Mg/m³	%	%	cm/h	%	Cm
MEDIA	2.05	1.09	12.37	28.42	4.49	88.53	15.37
DESV EST	0.01	0.00	0.30	1.18	0.30	1.72	0.25
%CV	0.45	0.45	2.42	4.16	6.79	1.94	1.62
E. ZAPATA	Mg/m³	Mg/m³	%	%	cm/h	%	Cm
MEDIA	1.90	1.02	7.84	17.19	5.77	98.30	14.25
DESV EST	0.03	0.02	0.30	1.44	0.36	0.60	0.15
%CV	1.65	1.65	3.83	8.38	6.33	0.61	1.05

En cuanto a la capacidad de campo (C.C.), los suelos de los municipios de Apan y Almoloya de 13.46% y 12.37% respectivamente, corresponde a las características de texturas en estos suelos (francos arcillo arenosos), además con los bajos contenido en materia orgánica encontrado en estos suelos. La menor C.C. correspondió a los suelos del municipio E. Zapata 7.84% siendo este un suelo de textura franco arenoso, es entendible que tenga las menores C.C., debido a que las fracciones de arena y de limo en este suelo están en menores proporciones, además igualmente bajos contenidos de materia orgánica.

La estructura del suelo según Montenegro (1991) tiene influencia en la mayoría de los factores de crecimiento de las plantas, una estructura desfavorable puede acarrear problemas en el desarrollo de las plantas, en la disponibilidad de nutrientes, la aireación, el exceso o deficiencia de agua, la baja actividad microbiana, el impedimento para el desarrollo de las raíces, una estructura favorable permitirá que los factores de crecimiento actúen eficientemente y se obtengan, en consecuencia, los mayores rendimientos de las cosechas.

La estructura del suelo y la agregación están dadas por dos fenómenos importantes que son la floculación y la cementación. la floculación se debe a fenómenos electrocinéticos, se produce cuando partículas cargadas negativamente se acerca lo suficiente a otras de igual carga de tal manera que puedan ser unidas por un puente de carga contraria; al perder estabilidad en el sistema, muchos coloides "floculan"; y la cementación, consiste en el enlace mutuo de las partículas floculadas, por acción de diferentes materiales o sustancias, denominadas "cementantes"; materiales orgánicos (humus), coloides inorgánicos (Si, Al, Fe), carbonatos, óxidos, entre otros.

La formación de agregados estables requiere que las partículas primarias estén firmemente unidas entre sí, que no se dispersen en agua. La formación de agregados incluye la floculación y la cementación. De acuerdo a lo antes mencionada, los suelos más estructurados son los de Apan y corresponden con los más altos valores de agregados estables. Esto también corresponde con los



mayores contenidos de MO que coincide con lo reportado por otros estudios realizados donde han enfatizado la relación entre estabilidad de agregados y el contenido de MO (Pulido *et al.*, 2009)

La velocidad de infiltración es mayor en E. Zapata y por tanto corresponde con los suelos más arenosos y menos compactados. La infiltración se define como el proceso por el cual el agua penetra por la superficie del suelo y llega hasta sus capas inferiores (Ruiz *et al.*, 2004). Muchos factores influyen en la velocidad infiltración de los suelos, como las características hidráulicas del suelo o retención de humedad del suelo, los porcentajes de arcilla, tipo de cubierta vegetal, porosidad, estructura, agentes cementantes y compactantes del suelo, así como también gobiernan el movimiento del agua dentro del mismo y su distribución durante y después de la infiltración. (Vélez *et al.*, 2002).

La saturación de bases las constituyen los cationes Ca, Mg, Na y K, en principio porque son las que existen en mayor proporción y son necesarias. Para un suelo en el que todos los contra iones corresponden a estas cuatro bases, se dice que está saturado. La presencia mayoritaria de estos cationes en los suelos en estudios justifican los altos valores del porcentaje de saturación de bases. Estos altos valores de saturación de bases en suelos de estos tres municipios; 94.20% Apan, 88.53% Almoloya y 98.30% Emiliana Zapata, están asociados mayoritariamente al uso en estas regiones de encalado y fertilizantes. Los tres municipios presentan un valor mayor del 85%. El porcentaje de saturación de bases expresa la proporción de bases que hay respecto del total de la capacidad de intercambio de cationes (CIC). Es importante saber entonces, la proporción de bases que contiene un suelo porque indica el potencial de acidez del suelo. Cuanto mayor es el porcentaje de saturación de bases menor es la acidez de reserva que hay en el complejo de intercambio. Por otra parte, es importante saber cuáles son los cationes dominantes en las superficies de los coloides por su efecto sobre la estructura del suelo.

El calcio tiene un efecto floculante, mientras que el sodio dispersa el suelo. Esta diferencia en su efecto sobre la orientación y cohesión de los coloides entre el calcio y el sodio se debe a la efectividad con la cual neutralizan las cargas negativas de los coloides. Cuánto más pequeño es el radio hidratado, y cuánto mayor la valencia de un catión, mayor es su poder de flocular el suelo. Por lo tanto el calcio que es bivalente provoca mayor floculación en los coloides del suelo, que el sodio y tiene un menor radio hidratado (0.56 Calcio, 0.76 Sodio).

Los espectros EDS que fueron obtenidos por microscopía electrónica de barrido (MEB) de los suelos iniciales se muestran en la figura VI.6 a, b y c, correspondiendo a suelos de Almoloya, Apan y Emiliano Zapata, respectivamente. De forma cualitativa se observan las señales de los elementos que fueron detectados por FRX y por análisis en ICP.

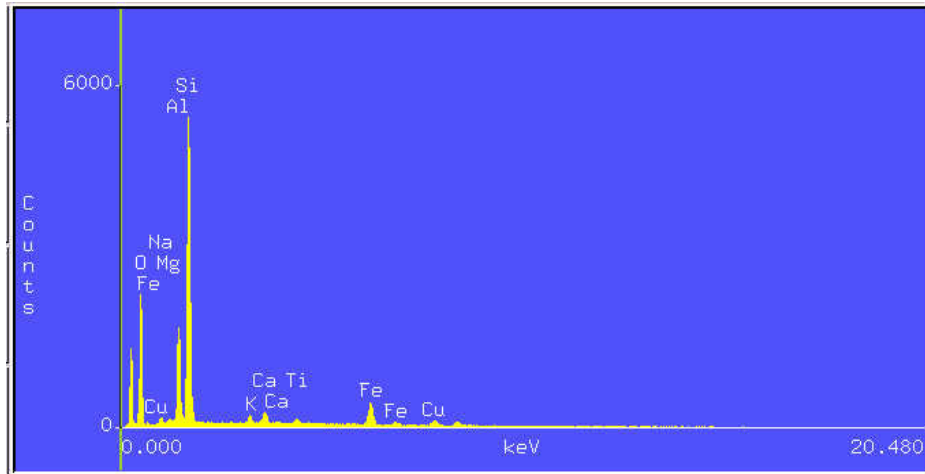


Figura VI.6. Espectro EDS por MEB de suelos en los inicios de los ensayos en macetas.
A) Suelo del Municipio de Almoloya.

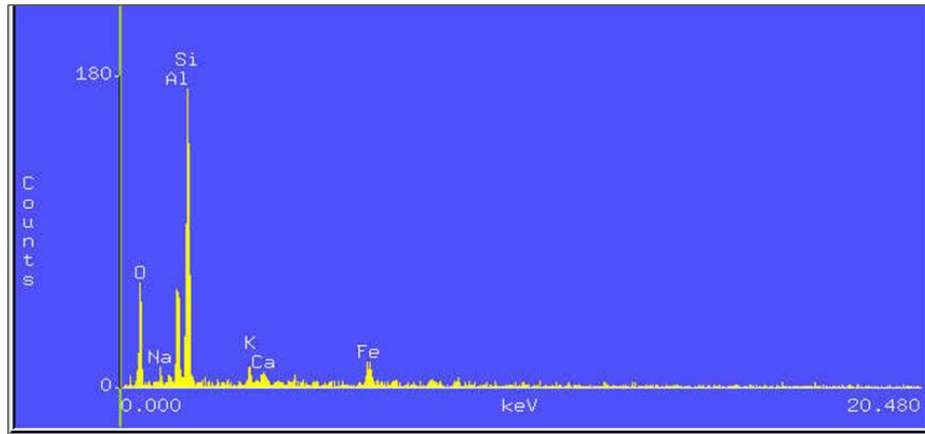


Figura VI.6. Espectro EDS por MEB de suelos en los inicios de los ensayos en macetas.
B) Suelo del Municipio de Apan.

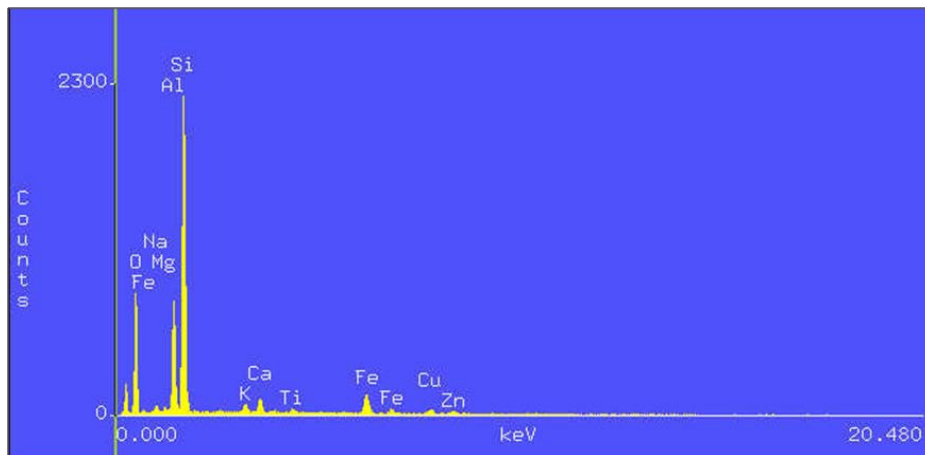
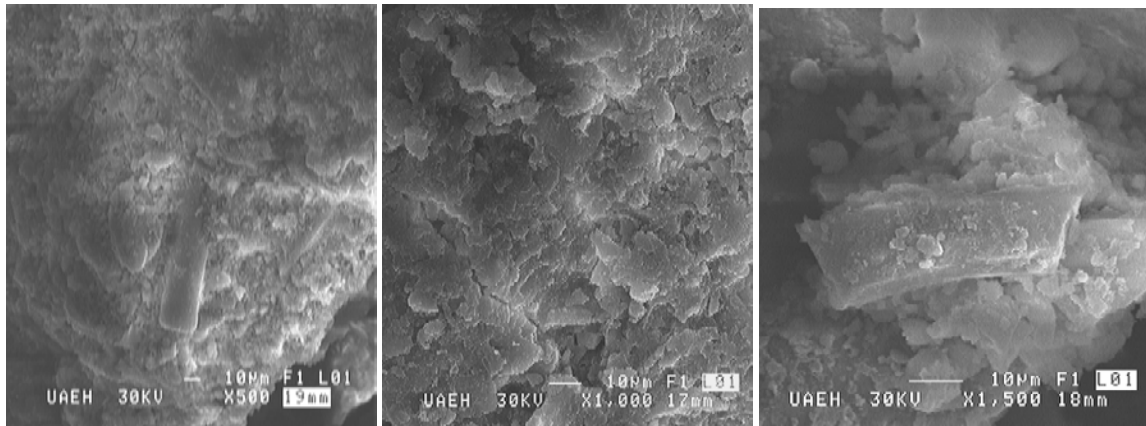


Figura VI.6. Espectro EDS por MEB de suelos en los inicios de los ensayos en macetas.
C) Suelo del Municipio de Emiliano Zapata.



Las microfotografías correspondiendo a suelos de Almoloya, Apan y Emiliano Zapata, respectivamente, se muestran en la figura VI.7 a, b y c, respectivamente.



a) Suelo de Almoloya.

b) Suelo de Apan.

c) Suelo de Emiliano Zapata.

Figura VI.7. Microfotografías obtenidas por MEB de los suelos en los inicios de los ensayos en macetas.

En las microfotografías (fig. VI.7.) se pueden observar estructuras de tipo cristalinas de cuarzo y plagioclasas. Se pueden apreciar agregados más estables en los suelos de Apan (figura VI.7 b). La plagioclasa es un mineral del grupo de los tectosilicatos cuya composición varía desde el término más ácido (albita, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) al más básico (anortita, $(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$) que suele cristalizar tanto en rocas volcánicas, por ejemplo basaltos o andesitas.

VI.2. Conclusiones de los estudios de caracterización de suelos.

En los suelos de la región de estudio (municipios de Almoloya, Apan y Emiliano Zapata, estado de Hidalgo), los contenidos de materia orgánica son muy bajos y se trata de suelos con porcentajes bajos de arcilla.

Los valores de pH de neutros a moderadamente ácidos, mostrados por los suelos analizados de las tres regiones, son características favorables para el cultivo de cebada, por encontrarse más disponibles los contenidos de nutrientes principales como calcio, magnesio y potasio. Sin embargo el caso particular de los suelos del municipio de Emiliano Zapata, que se presentan excedidos en calcio (por encalados) y bajos en potasio, pueden resultar perjudiciales para el rendimiento del cultivo de cebada en las parcelas estudiadas de este municipio, sobre todo por la falta de potasio ya que este cultivo es tolerante al calcio. La falta de potasio origina que los bordes de las hojas se doblen, sean de tamaños pequeñas y toman un tono pardo amarillento. La carencia de potasio puede ser difícil de detectar, pues se producen pérdidas del rendimiento mucho antes de que aparezcan síntomas visibles.

Los valores de potencial redox (Eh), indicaron que los suelos cebaderos de los municipios evaluados resultan poco reductores a intermedios reductores. Esta característica corresponde también con suelos de bajas concentraciones de sales



disueltas en la fase acuosa. El caso particular de los suelos del municipio Emiliano Zapata que resultaron ser los más salinos, asociado a las elevadas concentraciones de calcio, pese a que otros nutrientes (como el potasio) se encuentran en bajas concentraciones.

Los porcentajes bajos de arcilla y de materia orgánica en estos suelos, provocan una baja retención de agua, implicando también por ello una relativa baja CIC con lo cual no son óptimamente aprovechados los nutrientes principales y las lixiviaciones y escurrimientos de los mismos pueden resultar elevadas. Estas capacidades de escurrimiento pueden afectar mantos acuíferos lo cual no ha sido estudiado hasta el momento en la región.

El monocultivo, ha propiciado que bajen los contenidos de arcilla, esto traería como consecuencia que las CIC disminuyan, aumentando también los posibles lixiviados de nutrientes principales a horizontes más profundos donde no llegan las raíces del cultivo de cebada, lo que afectaría la absorción de los mismos y por ello también los rendimientos por hectáreas.

Las bajas CIC están asociadas a las bajas concentraciones de materia orgánica, unido a los bajos niveles de arcilla, implican que la materia orgánica total sea poco disponible para el cultivo. Sería necesario valorar las necesidades de incremento en materia orgánica más disponible, MO biodegradable. La baja retención de humedad de estos suelos, puede provocar poca germinación al inicio del cultivo, igualmente provoca poca humificación de la MO. Debe recordarse que el grano de cebada requiere para su germinación absorber alrededor de un 40 % de humedad en la etapa de germinación y formación de la radícula y MO orgánica disponible (Dendy *et Dobraszczuk*, 2004).

VI.3. Evaluación de indicadores e índices de calidad de suelos cebaderos.

Al realizar la evaluación de la calidad de los suelos cebaderos del sur del estado de Hidalgo, al tener en cuenta el número de indicadores mínimos (Cantú *et al.*, 2009), se han establecidos los indicadores e índices para los municipios que se observan en la tabla VI.10.

Tabla VI.10. Indicadores propuestos para evaluación de calidad de suelos (ICS) cebaderos.

Indicador	U.M.	ICS	
		Máx.	Mín.
pH	-	8.50	5.00
COS	%	6.00	1.00
Saturación de Bases	%	100	50
Agregados estables en agua	%	75	10
Velocidad de infiltración	cm/h	10	1
Densidad aparente	Mg.m ⁻³	1.50	1.05
pZ	mV	+30	-30
Espesor de horizonte A	Cm	45	0

COS = Carbono orgánico del suelo.

Para la obtención de un valor único de cada parámetro por cada municipio se realizó un promedio ponderado de acuerdo a la proporción que representa cada



manejo en el área total estudiada. Luego los indicadores fueron normalizados utilizando una escala 0-1 que representan, respectivamente, la peor y mejor condición desde el punto de vista de la calidad, independientemente de los valores absolutos medidos para cada indicador y obtenidos como resultados experimentales.

Fueron planteadas dos situaciones posibles (Cantú *et al.*, 2007; Cantú *et al.*, 2009): la primera es cuando el valor máximo del indicador ($I_{máx}$) corresponde a la mejor situación de calidad de suelo (Valor normalizado del indicador: $V_n = 1$) y el cálculo es:

$$V_n = (I_m - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad \text{Ecuación 1.}$$

La otra situación es cuando el valor I_{max} corresponde a la peor situación de calidad de suelo ($V_n = 0$) y se calcula como:

$$V_n = 1 - (I_m - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde

V_n = valor normalizado,

I_m = medida del indicador,

I_{max} = valor máximo del indicador,

I_{min} = valor mínimo del indicador.

Los valores máximos y mínimos fueron establecidos de diferentes formas para cada indicador. Para las condiciones óptimas, se tuvieron en cuenta umbrales de toxicidad o a partir de los valores de referencia para suelos reportados en las bibliografías (Breuer *et al.*, 2006; Cantú *et al.*, 2007; Cantú *et al.*, 2009), mientras que en otros se utilizaron criterios teóricos reportados para suelos dedicados al cultivo de cebada (Vera *et al.*, 2002; Álvarez *et al.*, 2006).

Para el COS (carbono orgánico del suelo) por ejemplo, se consideró como mínimo, el requerimiento para cumplir con la condición de mólico (Soil Survey Staff, 2006) que se refiere a suelos oscuros con concentraciones mayores a los mínimos de COS ($\geq 0.6\%$ ó $\geq 1\%$ de materia orgánica) y suelos evolucionados (FAO, 1999; Cantú *et al.*, 2007); y como máximo el promedio de los valores reportados en suelo para el cultivo de cebada, según bibliografía (Álvarez *et al.*, 2006; Hati *et al.*, 2007; Cantú *et al.*, 2007; Cantú *et al.*, 2009); se considera el mínimo en 1% y el máximo en 7%, lo cual obedece igualmente a la clasificación que indica Boulding (1995) para suelos no volcánicos.

El valor mínimo de pH fue establecido considerando el punto de toxicidad para el desarrollo del cultivo de cebada en la zona (pH de 5.0) y el máximo de calidad correspondió al pH apto para el cultivo de cebada (Vera *et al.*, 2002; Álvarez *et al.*, 2006; Soil Survey Staff, 2006; Pulido *et al.*, 2009).

Para el indicador agregados estables en agua, el valor máximo se obtuvo promediando valores medidos en trabajos reportados en la bibliografía (Shepherd *et al.*, 2001; Holeplass *et al.*, 2004; Lado *et al.*, 2004; Márquez *et al.*, 2004; Bronik



et al., 2005; Pulido *et al.*, 2009). El mínimo correspondió a los valores mínimos medidos en la región.

Para la saturación de bases se tomaron el valor mínimo (50%) y el máximo (100%) requeridos para cumplir con la condición de mólico antes mencionada (Soil Survey Staff, 2006).

En el caso de la velocidad de infiltración, se tomó como mínimo la velocidad a la cual se han documentado problemas de infiltración en la región (Gómez *et al.*, 2004; García *et al.*, 2008) y como máximo los valores de infiltración esperados de acuerdo a las características del suelo (FAO, 1999; Soil Survey Staff, 2006) que en este caso clasifican entre franco arcillo arenosos, para los suelos de Almoloya y Apan y franco arenosos, para los suelos de Emiliano Zapata.

La densidad aparente mínima corresponde al promedio de los valores que se reportan para suelos de uso agrícola para cultivo de cebada (Márquez *et al.*, 2004; Bronik *et al.*, 2005; Pulido *et al.*, 2009) y la máxima a los valores máximos medidos en la región.

Para el indicador de potencial zeta (pZ), esta es la primera vez que se utiliza para tales fines; en este sentido se tomó como criterio de máximo y mínimo lo reportado en la bibliografía acerca de que a valores <-30 mV y $>+30$ mV, resultan estables las suspensiones coloidales de extractos de saturación de suelos (Prieto *et al.*, 2009). Se ha reportado (Unzueta *et al.*, 2007) que el incremento de la capacidad de infiltración del suelo frente al agua (generalmente por efecto temporal) así como el aumento en la estabilidad de los agregados frente al agua y a los agentes mecánicos, pueden estar regidas por una acción como la disminución del potencial Zeta (pZ) de las partículas del suelo.

El pZ es la medida que determina la carga de un coloide (milivolts), en función de la superficie cargada y la naturaleza y composición del medio en el que está suspendido. Las sales iónicas que pueden solubilizarse totalmente en medios acuosos no pueden ser clasificadas como coloides ya que se encuentran en la fase continua y por lo tanto su pZ, es muy pequeño. En la mayoría de los suelos el potencial Zeta es negativo debido a que la superficie del suelo generalmente tiene carga negativa. Con el incremento de la acidez, el pZ se hace menos negativo y, en algunos casos, pueda alcanzar valores positivos. Estos cambios afectan la velocidad del flujo electroosmótico, ya que se ha observado que la tasa de flujo decrece cuando el pH del electrolito se acerca a la neutralidad o se incrementa la alcalinidad (de la Rosa *et al.*, 2007).

En el caso del indicador espesor del horizonte A, el máximo espesor corresponde al medido en promedio en suelos de referencia (45 cm) reportados (Gómez *et al.*, 2004; García *et al.*, 2008), mientras que el mínimo se estableció como cero (nivel superficial de la capa arable).

Finalmente, se estableció un índice de calidad de suelos (ICS) promediando los valores de todos los indicadores. Para la interpretación del ICS se utilizó una



escala de transformación en cinco clases de calidad de suelo (de 1 a 5) (Cantú *et al.*, 2007). que se muestra en la tabla VI.11. Para la clase 1 se definieron dos niveles.

Tabla VI.11. Clases de calidad de suelos.

Índice de calidad de suelos	Escala	Clase
Excelente calidad	0.90 – 1.00	1
Muy alta calidad	0.80 – 0.89	1
Alta calidad	0.60 – 0.79	2
Moderada calidad	0.40 – 0.59	3
Baja calidad	0.20 – 0.39	4
Muy baja calidad	0.00 – 0.19	5

En la tabla VI.12 se presentan los valores normalizados de los indicadores calculados y el índice de calidad de los suelos (ICS) cebaderos, resultante por cada municipio. El indicador que presentó el menor valor en promedio para los tres municipios, fue el COS (0.18) mientras que el mayor correspondió a la saturación de bases (0.94). El pH y la densidad aparente presentaron valores promedios intermedios (0.52 – 0.55), y los restantes indicadores oscilaron entre valores desde 0.34 hasta 0.50. El nuevo indicador que se propone, el pZ, marca un ICS de 0.61.

El indicador pH presenta en promedio un valor de calidad de 0.55. En la mayoría de los suelos de la región existe una disminución del pH en el horizonte superficial (A) respecto a los suelos de referencia. Esta situación también ha sido reportada por otros investigadores (Pulido *et al.*, 2009), cuando se refieren a que en sistemas de monocultivos esta tendencia se observa para muchos tipos de suelos. Sin embargo, los valores medidos aún distan considerablemente del punto de toxicidad establecido para el cultivo de cebada (<5.0).

Tabla VI.12. Indicadores e índices de calidad de suelos (ICS) por municipios.

Indicador	Valores de ICS por municipio			ICS
	Apan	Almoloya	E. Zapata	Promedio
Ph	0.59 ^a	0.49 ^b	0.56 ^a	0.55
COS	0.20 ^a	0.18 ^a	0.17 ^a	0.18
Saturación de Bases	0.94 ^a	0.89 ^b	0.98 ^a	0.94
Agregados estables en agua	0.41 ^a	0.38 ^a	0.23 ^b	0.34
Velocidad de infiltración	0.62 ^a	0.58 ^a	0.44 ^b	0.56
Densidad aparente	0.56 ^a	0.52 ^a	0.48 ^a	0.52
pZ	0.61 ^a	0.64 ^a	0.59 ^a	0.61
Espesor de horizonte A	0.36 ^a	0.34 ^a	0.32 ^a	0.34
VALORES PROMEDIOS	0.55^a	0.50^b	0.47^b	0.50

Letras diferentes en filas indican diferencias significativas (p<0.05)

El valor promedio del indicador COS para los suelos cebaderos de la región sur del estado de Hidalgo, evidencia una disminución en la calidad de un 82% respecto de los suelos tomados como referencia. La marcada disminución de la materia orgánica ha sido observada en diversas investigaciones en la región (López *et al.*, 2005; Prieto *et al.*, 2009).

El valor del indicador saturación de bases es muy cercano al máximo de calidad (0.94). En este caso también el indicador refleja en gran medida la situación de los suelos locales. Los materiales loésicos sobre los que se desarrollan estos suelos



(Medina *et al.*, 2006) son ricos en calcio y por lo tanto, la saturación de bases es muy alta, a pesar del uso de los suelos en sistema de monocultivo que data de más de 40 años.

El indicador agregados estables en agua presenta un valor de calidad promedio de 0.34. La importante disminución del porcentaje de macroagregados en la región, respecto de los suelos de referencia, refleja la influencia negativa del manejo en esta propiedad como fuera señalado por algunos autores a nivel local (López *et al.*, 2005; Prieto *et al.*, 2009) por sistema de monocultivo, e internacional por otros autores (Gregorich *et al.*, 1994; Doran *et al.*, 1997; Cantú *et al.*, 2007; Volverás *et al.*, 2009). El uso y abuso del monocultivo corroboran las afectaciones en la textura de los suelos y con ello a la formación de agregados estables (Pulido *et al.*, 2009; Volverás *et al.*, 2009). Volverás *et al.* (2009) reportan que la intensidad de uso de suelo afecta negativamente propiedades físicas del suelo como la textura (haciéndolos menos arcillosos) y la densidad aparente (disminuyendo) y propiedades químicas como la pérdida considerable de materia orgánica. Estos mismos autores señalan que la pérdida de materia orgánica y con ello la pérdida de humus, genera disminución de macroagregados del suelo, de la porosidad, capacidad de infiltración y aumenta la erosión. Estas observaciones corresponden con resultados obtenidos en los suelos evaluados de Apan, Almoloya y E. Zapata, donde se han encontrado valores de arcilla próximos al 20% y de arena mayor de 50%.

El valor de 0.45 del indicador velocidad de infiltración señala que esta propiedad en la región evaluada dista en un 55% de los valores de infiltración esperados de acuerdo a las características del suelo (Soil Survey Staff, 2006). Este parámetro se ve afectado en gran medida por los valores de los suelos del municipio de Emiliano Zapata (0.56), lo que corresponde con suelos clasificados como arenosos. En investigaciones realizadas, se ha señalado que la disminución de la velocidad de infiltración estaría asociada a la compactación del horizonte superficial y subsuperficial (Prieto *et al.*, 2009).

El indicador densidad aparente revela que los suelos tienen un nivel medio de compactación, dado que el valor promedio ponderado de la región se encuentra entre los valores mínimos de los sitios de referencia y los máximos medidos en la región. Este valor no sería restrictivo para el crecimiento de raíces del cultivo de cebada en este tipo de suelos (Vepraskas, 1994; USDA-NRCS, 1999).

En cuanto al pZ, que se refiere a la estabilidad de suspensiones coloidales en el extracto de saturación de suelos, debe señalarse que es la primera vez que se reportan estos resultados. Se puede apreciar que en promedio se alcanza un ICS que los permite clasificar como suelos de alta calidad (0.61); sin embargo debe recordarse que estas suspensiones coloidales son de bajas concentraciones por cuanto corresponden a bajos contenidos de materia orgánica (COS).

Cuanto mayor sea esta fuerza dispersora (pZ), mayor estabilidad tendrá la solución y mayor será su capacidad para acarrear partículas en suspensión; o



capacidad de carga. La siguiente tabla (tabla VI.13) muestra la relación entre la estabilidad de una solución y su potencial zeta (de la Rosa *et al.*, 2007).

En este sentido se puede entender que los extractos de saturación de los suelos se presentan con valores de pZ que los ubica en un umbral de leve dispersión a moderada, por poca concentración de materia orgánica disponible.

Tabla VI.13. Relación de la estabilidad de una suspensión coloidal en función de los valores del potencial Zeta (pZ).

Estabilidad	Potencial Z (mv)
Muy buena. Dispersión extrema	-100 -60 mv
Buena	-60 -40 mv
Moderada	-40 -30 mv
Umbral de leve dispersión	-30 -15 mv
Umbral de aglomeración	-15 -10 mv
Fuerte aglomeración y precipitación	-5 +5 mv

Un factor crucial para mantener el flujo normal de soluciones a través de los capilares del suelo, es la conservación del máximo estado de dispersión de las partículas suspendidas en el coloide. Esto impide que se aglutinen bloqueando los pequeños vasos.

El agua que es el solvente universal y que tiene dos iones positivos monovalentes de hidrógeno ($2H^+$) y uno divalente negativo de oxígeno (O^{2-}). El medio coloidal está formado por partículas con carga eléctricas. La dispersión ocurre debido a la repulsión mutua de las cargas con la misma polaridad. Los iones positivos disminuyen la capacidad de carga mientras que los negativos la aumentan. Los elementos con solo una carga positiva o negativa, (monovalentes), como el potasio, sodio (+1), o cloro (-1), tienen poco efecto en las suspensiones. Los que tienen 2 cargas o iones divalentes tales como el magnesio (+2), o el oxígeno tienen un efecto 3.0 veces mayor sobre la capacidad de carga que los iones monovalentes. Los iones trivalentes como el aluminio (+3), nitrógeno o el fósforo (-3) aumentan 6.0 veces más la capacidad de carga que los iones de una sola carga. La adición de cantidades muy pequeñas de iones trivalentes tiene un efecto masivo, dispersante o aglutinante según la polaridad, sobre la capacidad de carga. En la siguiente figura (Figura VI.8), puede verse el efecto de varias sales sobre el potencial Zeta.

Los números a la derecha de cada sal indican la relación de cargas positiva:negativa. Por ejemplo el cloruro de aluminio $AlCl_3$ tiene 3 cargas positivas y 1 negativa, o sea es un catión polivalente que disminuye el potencial Zeta, lo hace menos negativo y aglutina las partículas.

El cambio de acción que ocurre después de la meseta aproximadamente entre los 100 y 500 mg/L se debe a que una sobrecarga excesiva de iones disminuye el pZ y aumenta el riesgo de precipitación. El potencial zeta es como se ha indicado, una medida para determinar la carga del coloide. Para coloides en fuentes de agua natural con un pH de 5 a 8, el pZ se encuentra entre los -14 y -30 milivolts; cuanto más negativo sea el número, tanto mayor será la carga de la partícula. A



medida que disminuye el pZ, las partículas pueden aproximarse cada vez más aumentando la posibilidad de una colisión. Esta es la explicación del bajo pZ en suelos de E. Zapata, aparentemente por las aplicaciones de encalado (CaSO_4), las que por encima de 500 mg/L propicia la disminución de los valores de pZ.

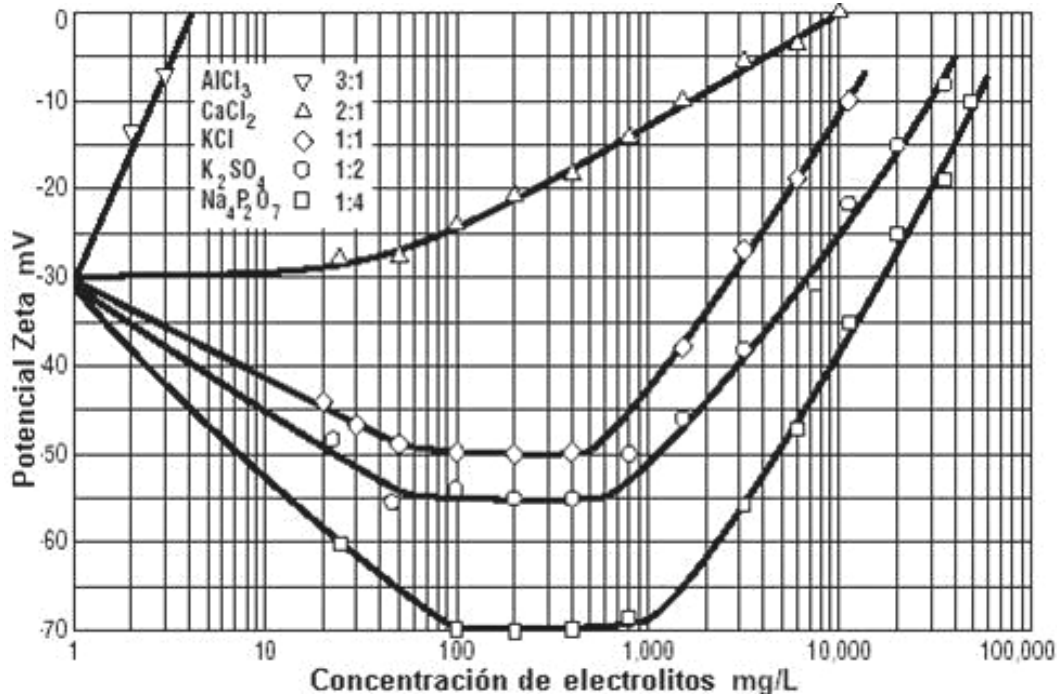


Figura VI.8. Variaciones de los potenciales Zeta (pZ) a diferentes concentraciones de sales en medios acuosos. (Malvern, 2004).

El valor bajo del indicador espesor del horizonte A (0.34) muestra la marcada disminución respecto de los suelos de referencias (Holeplass *et al.*, 2004; Lado *et al.*, 2004; Márquez *et al.*, 2004; Bronik *et al.*, 2005), que alcanza un 66% en estos suelos evaluados. Esto se debe principalmente a procesos de erosión hídrica que han sido estimados en la zona por mediciones directas en campo y por resultados de texturas franco arenoso.

El índice de calidad promedio de los suelos de esta región cebadera (ICS: 0.50) obtenido mediante este set mínimo de indicadores (tabla VI.10) se ubica en la clase 3, de moderada calidad de suelos (tabla VI.11). El valor del ICS está fuertemente influenciado por el indicador COS, que fue la propiedad más afectada por el manejo de estos suelos. El COS es considerado un atributo clave dada su marcada influencia sobre la mayoría de las propiedades del suelo (Gregorich *et al.*, 1994). La disminución del COS sería la causa principal de los valores bajos del indicador estabilidad de agregados e infiltración y medio del indicador densidad aparente. Estos cambios en las propiedades físicas afectan la condición superficial del suelo provocando un incremento de los procesos de erosión, con la



consiguiente pérdida de espesor del horizonte superficial, reflejada por el indicador correspondiente.

El set de indicadores utilizados para evaluar la calidad del suelo cumple con los criterios más importantes requeridos para su uso como indicadores. Se trata de un número mínimo de variables o atributos del suelo que integran información de otras variables asociadas, incorpora indicadores físicos, químicos y fisicoquímicos, y en su mayoría son de fácil medición. Lo expuesto evidencia la aptitud de los indicadores seleccionados para reflejar, en términos de calidad, los cambios en cada una de las propiedades. En la construcción del set se consideraron las principales propiedades de los suelos del área para que los indicadores representen las condiciones locales.

Se descartaron indicadores que, si bien forman parte de listas muy usadas en diferentes del mundo (Doran *et al.*, 1997), no tienen validez local. Por ello, es importante señalar que estos indicadores de estado del recurso suelo no son universales sino que deben ser elegidos en función del tipo de ambiente y suelo de la región en estudio. Estos resultados representan una instantánea para la situación de los años 2007 - 2010. Para darle el sentido temporal será necesario realizar mediciones secuenciales en lapsos de tiempo tales que permitan registrar cambios en los atributos utilizados vinculados a las condiciones de uso y manejo de los suelos (Cantú *et al.*, 2007).

VI.4. Ensayos en macetas.

VI.4.1. Caracterización de cultivos por etapas de desarrollo y órganos de la planta.

Los resultados de caracterización del cultivo de cebada que fue estudiado en macetas, según se indicó en el apartado V.3, se presentan en base seca, por etapas del desarrollo del cultivo y por órganos del mismo. Para ello se calculó inicialmente la humedad en cada caso. Los resultados de humedades se aprecian en la tabla VI.14 a, b y c, para el cultivo sembrado en suelos de Almoloya, Apan y Emiliano Zapata, respectivamente.

En las tablas VI.14 a, b y c; se puede observar que la semilla en la primera etapa ha absorbido entre 30-40%, lo que se corresponde con lo señalado en la bibliografía (Dendy *et al.*, 2004). En la segunda etapa persiste algo de semilla que a partir de la tercera etapa ha germinado totalmente solo encontrándose raíces y radícula. Ya en la segunda etapa sólo presenta un 23% de humedad.

Es en la segunda etapa en la que la raíz exhibe la mayor cantidad de humedad al igual que las hojas; el tallo y la espiga alcanzan su máximo en la tercera etapa y el grano en la cuarta etapa.



Tabla VI.14.a. Humedades por etapas de desarrollo y órganos del cultivo. A) Sembrado en suelos de Almoloya (% m/m).

HUMEDAD CEBADA (ALMOLOYA) AGUA (Des. Est.)						
ETAPA	SEMILLA	RAÍZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANO
1	42.95 (3.58)	14.82 (0.53)	3105 (0.99)			
2	23.71 (1.44)	22.13 (1.08)	30.85 (1.13)	20.09 (0.73)		
3		21.73 (2.63)	29.54 (0.67)	26.76 (0.81)	13.18 (0.93)	
4		20.14 (0.84)	24.01 (0.73)	23.68 (0.85)	7.65 (0.47)	20.75 (1.09)
5		19.33 (0.69)	25.11 (1.15)	24.27 (0.65)	6.84 (0.92)	17.14 (0.73)
HUMEDAD CEBADA (ALMOLOYA) PLOMO (Des. Est.)						
ETAPA	SEMILLA	RAÍZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANO
1	34.74 (1.37)	21.56 (0.57)	29.40 (0.78)			
2	20.20 (0.97)	25.49 (1.75)	30.45 (0.53)	19.63 (0.92)		
3		22.50 (1.53)	28.62 (0.61)	25.78 (0.84)	15.10 (0.70)	
4		19.92 (2.02)	23.87 (0.79)	25.11 (1.09)	6.95 (0.23)	22.11 (1.85)
5		18.72 (0.94)	22.58 (0.77)	24.32 (0.90)	4.24 (0.66)	19.05 (0.99)
HUMEDAD CEBADA (ALMOLOYA) NÍQUEL (Des. Est.)						
ETAPA	SEMILLA	RAÍZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANO
1	35.29 (2.91)	21.25 (0.55)	26.75 (0.24)			
2	19.95 (1.39)	26.82 (2.62)	31.12 (0.17)	18.54 (0.14)		
3		22.95 (0.67)	26.66 (2.12)	24.26 (1.15)	11.48 (0.15)	
4		17.60 (0.18)	20.49 (0.89)	23.53 (0.95)	6.38 (0.72)	24.22 (0.22)
5		14.11 (0.20)	19.71 (0.44)	20.67 (0.30)	4.63 (0.46)	20.73 (0.94)

Tabla VI.14.b. Humedades por etapas de desarrollo y órganos del cultivo. B) Sembrado en suelos de Apan (% m/m).

HUMEDAD CEBADA (APAN) AGUA (Des. Est.)						
ETAPA	SEMILLA	RAÍZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANO
1	43.38 (1.19)	14.34 (1.19)	30.65 (0.36)			
2	23.01 (0.81)	20.33 (0.92)	31.31 (1.06)	17.36 (1.12)		
3		17.97 (1.11)	24.92 (0.91)	23.98 (0.63)	12.47 (0.46)	
4		16.91 (0.76)	20.71 (0.86)	14.35 (0.36)	5.69 (0.58)	23.20 (1.31)
5		16.72 (0.75)	20.49 (0.96)	13.47 (0.47)	5.08 (0.43)	20.54 (0.64)
HUMEDAD CEBADA (APAN) PLOMO (Des. Est.)						
ETAPA	SEMILLA	RAÍZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANO
1	32.37 (2.76)	24.06 (1.18)	29.71 (0.77)			
2	20.33 (0.89)	23.64 (0.91)	31.16 (0.13)	17.09 (0.94)		
3		18.85 (0.63)	27.05 (2.33)	23.80 (1.30)	13.57 (0.47)	
4		17.67 (0.36)	23.98 (0.63)	22.13 (1.18)	7.06 (0.50)	24.65 (0.92)
5		16.74 (0.63)	22.26 (1.21)	21.51 (0.32)	5.48 (0.67)	22.98 (0.29)
HUMEDAD CEBADA (APAN) NÍQUEL (Des. Est.)						
ETAPA	SEMILLA	RAÍZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANO
1	34.09 (1.25)	22.88 (1.17)	28.95 (0.73)			
2	19.08 (0.54)	25.74 (0.24)	30.75 (0.76)	17.64 (0.42)		
3		23.90 (1.38)	26.47 (1.39)	23.75 (1.32)	13.81 (0.41)	
4		19.53 (0.89)	22.69 (0.87)	22.13 (1.18)	6.57 (1.13)	23.68 (1.37)
5		15.10 (0.66)	20.49 (0.96)	20.25 (0.67)	4.81 (0.35)	20.87 (0.03)

En la tabla VI.15 se muestran los resultados de evaluación de la altura final que alcanzaron los cultivos de cebada en los ensayos en macetas, regados con agua, con agua contaminada con Ni^{2+} y/o Pb^{2+} a 0.5 mg/L. Se observa (promedios) que la mayor altura se alcanzó en suelos de Almoloya (SAL), le siguen en orden decreciente suelos de Apan (SAP) y de Emiliano Zapata (SEZ).

En los suelos de Almoloya (SAL) la presencia de Pb^{2+} hace que se refleje una reducción en el tamaño de la planta en su etapa final (antes de la recolecta) del 12% en tanto que la presencia de Ni^{2+} manifiesta una reducción menor, del 6%, todo con respecto al tamaño que alcanza el cultivo sólo por riego con agua (tabla



VI.15). Para los suelos de Apan (SAP), los efectos de estos metales provocan una reducción del 21% y 10% respectivamente.

Tabla VI.14.c. Humedades por etapas de desarrollo y órganos del cultivo. C) Sembrado en suelos de Emiliano Zapata (% m/m).

HUMEDAD CEBADA (E. ZAPATA) AGUA (Des. Est.)						
ETAPA	SEMILLA	RAÍZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANO
1	42.97 (3.59)	14.20 (0.13)	31.05 (0.10)			
2	23.53 (0.95)	23.99 (0.84)	30.79 (0.73)	20.01 (0.70)		
3		21.23 (0.61)	29.90 (0.67)	26.71 (2.64)	12.75 (0.23)	
4		20.16 (1.61)	24.16 (0.85)	23.82 (0.91)	7.12 (0.21)	21.09 (1.05)
5		19.87 (0.35)	25.07 (0.45)	24.49 (1.19)	6.90 (0.57)	17.34 (0.35)
HUMEDAD CEBADA (E. ZAPATA) PLOMO (Des. Est.)						
ETAPA	SEMILLA	RAÍZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANO
1	34.82 (0.33)	21.38 (0.19)	29.60 (0.32)			
2	20.37 (1.42)	25.48 (0.22)	30.53 (0.60)	19.58 (1.53)		
3		22.26 (0.80)	28.76 (1.68)	25.86 (0.52)	15.09 (0.25)	
4		19.73 (0.15)	23.78 (0.67)	25.32 (0.02)	6.75 (0.12)	22.13 (0.27)
5		18.72 (0.19)	22.51 (0.51)	24.55 (1.22)	4.24 (0.30)	19.13 (0.81)
HUMEDAD CEBADA (E. ZAPATA) NÍQUEL (Des. Est.)						
ETAPA	SEMILLA	RAÍZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANO
1	35.16 (3.14)	21.15 (0.53)	26.55 (0.13)			
2	19.83 (0.58)	26.75 (0.24)	31.15 (0.29)	18.64 (0.47)		
3		22.97 (0.45)	26.63 (0.64)	24.22 (0.22)	11.26 (0.78)	
4		17.12 (0.40)	20.27 (0.68)	23.30 (0.81)	6.10 (0.52)	24.17 (1.21)
5		14.38 (0.25)	20.30 (0.09)	20.39 (0.45)	4.93 (0.26)	20.75 (0.88)

Tabla VI.15. Evaluación del tamaño final (altura en cm) del cultivo en los experimentos realizados en maceta.

EXPERIM	S. ALMOLOYA			S. APAN			S. E. ZAPATA		
	AGUA	PLOMO	NÍQUEL	AGUA	PLOMO	NÍQUEL	AGUA	PLOMO	NÍQUEL
1	41.6	38.3	40.0	36.5	35.0	38.6	36.5	31.0	32.0
2	38.9	36.6	41.2	39.2	31.5	36.7	35.8	36.0	30.7
3	37.7	29.6	36.5	47.5	35.5	29.5	33.7	33.5	30.5
4	36.4	33.5	41.0	37.6	27.5	39.5	34.4	27.0	36.4
5	47.2	39.0	31.5	38.5	28.9	35.0	32.5	31.2	30.5
MEDIA	40.4	35.4	38.0	39.9	31.7	35.9	34.6	31.7	32.0
DESV. EST.	3.83	3.47	3.68	3.93	3.19	3.54	1.44	2.99	2.26
% CV	9.48	9.79	9.68	9.85	10.07	9.87	4.15	9.40	7.06

PROMEDIOS

Suelo	AGUA	PLOMO	NÍQUEL
SAL	40.4 (3.83) ^a	35.4 (3.47) ^a	38.0 (3.68) ^a
SAP	39.9 (3.93) ^a	31.7 (3.19) ^b	35.9 (3.54) ^a
SEZ	34.6 (1.44) ^b	31.7 (2.99) ^b	32.0 (2.26) ^a

Letras diferentes en filas indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

Estas variaciones son aproximadamente del doble con relación a los suelos de Almoloya y de forma similar, más marcada por la presencia de plomo que por la presencia de níquel. Esto pudiera estar asociado a que en los suelos de Almoloya existe una mayor presencia de arcillas que en los de Apan, con lo cual pudiera relacionarse una mayor capacidad de retención de estos metales por la mayor capacidad de retención de humedad, propiciando un efecto citotóxico para el desarrollo y crecimiento de la planta. Por otra parte se observa que en los suelos de Emiliano Zapata (SEZ) se presente una reducción en el tamaño final del cultivo, pero muy similares para la presencia de plomo y de níquel (aproximadamente de un 8% en ambos casos). Es importante considerar que estos suelos son principalmente arenosos a diferencia de los SAL y SAP. Esto corresponde a una menor capacidad para retener dichos metales y con suelos menos compactables.



En la tabla VI.16 muestra un resumen de las características finales de las plantas en los ensayos en macetas. Se observan diferencias entre haber regado con agua contaminada o no y comparadas con las características del cultivo en condiciones naturales, en campo y con riego de temporal. Se ven disminuidas características como ramificación en raíces, altura total, números de macollos, número de espigas y tamaños de granos.

Tabla VI.16. Características físicas del cultivo de la cebada, en la etapa final “Llenado de granos” en los ensayos en macetas con riegos.

Rasgos fundamentales	Suelos de Almoloya, Apan y E. Zapata, regados con agua de Pachuca	Suelos de Almoloya, Apan y E. Zapata, regados con agua contaminada con Pb ²⁺ (0.50 mg/L)	Suelos de Almoloya, Apan y E. Zapata, regados con agua contaminada con Ni ²⁺ (0.50 mg/L)	Condiciones típicas del cultivo en condiciones normales de siembra
Ramificación en raíz	Abundante	Media	Media	Abundante
Altura (% con respecto al valor mínimo normal)	38.3 cm (63.8) a	33.0 cm (54.9) b	35.2 cm. (58.7) a	60-150 cm
N° de Macollos	4	3	3	3 – 5
Hojas	Rizadas largas y angostas	Rizadas largas, angostas amarilleaban	Rizadas largas, angostas amarilleaban	Rizadas largas y angostas
No Espigas	4	3	2	3 – 5
Llenado de grano	Uniforme	No uniforme	No uniforme	Uniforme
Tamaño de los granos	7 mm	6 mm	5 mm	8 mm

Con relación a los contenidos de metales en órganos del cultivo y por las respectivas etapas del desarrollo se muestran de forma resumida algunos casos. En la figura VI.9 a, b y c, se comparan los contenidos de Na⁺ en raíz en las 5 etapas en los suelos de los tres municipios según riego con agua o agua contaminada con Ni²⁺ o Pb²⁺. Del análisis de estas figuras se aprecia que la bioacumulación de Na⁺ en la primera etapa es similar en los tres casos, independiente al riego con agua contaminada o no.

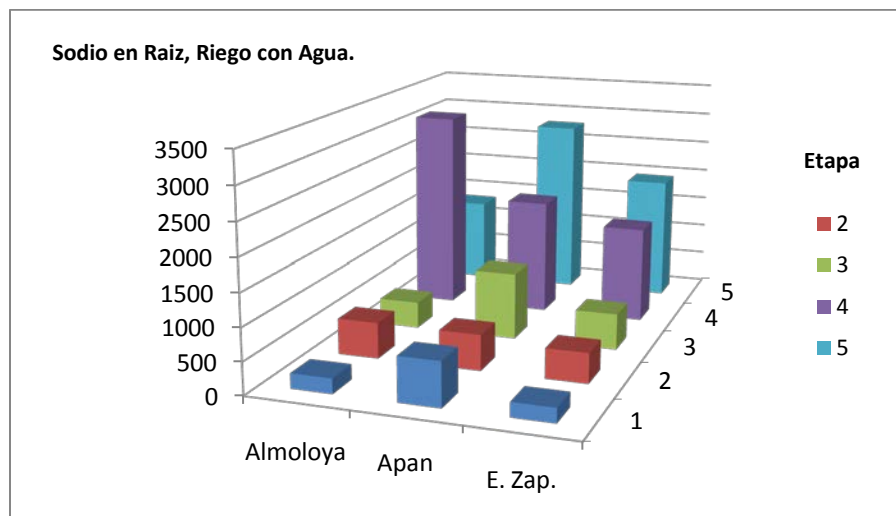


Figura VI.9.a. Contenidos de Na⁺ en raíz. Riego con agua.

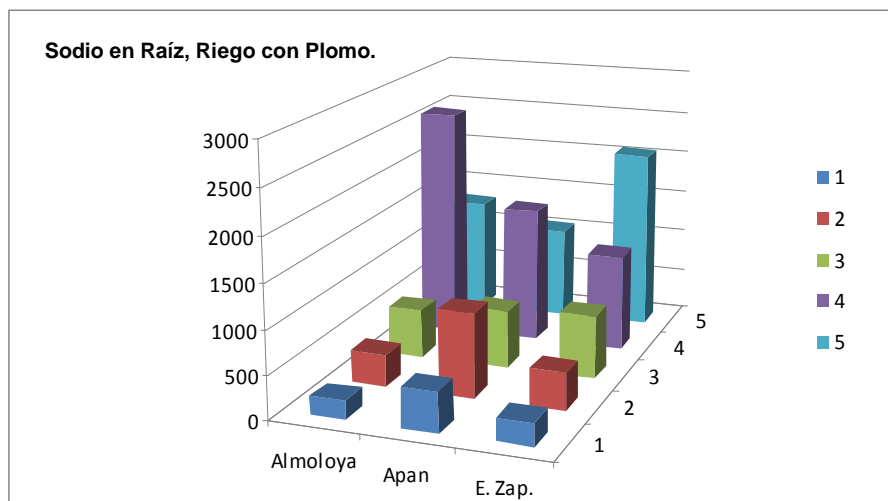
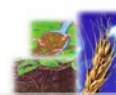


Figura VI.9.b. Contenidos de Na^+ en raíz. Riego con agua contaminada con Ni^{2+} .

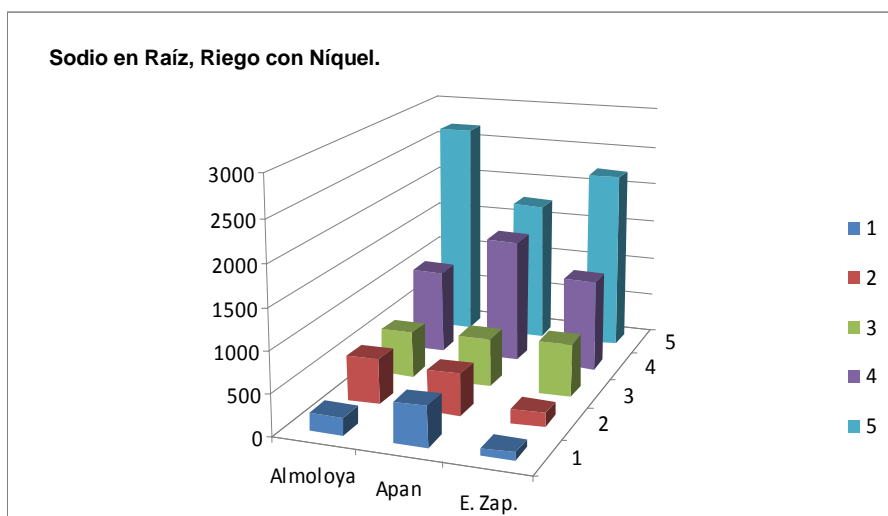


Figura VI.9.c. Contenidos de Na^+ en raíz. Riego con agua contaminada con Pb^{2+} .

En la segunda etapa el comportamiento es similar pero con un nivel de bioacumulación ligeramente superior, lo mismo que en la tercera etapa. Se marca una diferencia en la cuarta etapa para suelos de Almoloya y riegos con agua y agua contaminada con Pb^{2+} . Puede estar relacionado con los mayores contenidos de arcillas en estos suelos y las CIC.

En la figura VI.10 a,b y c; se comparan también los contenidos de Na^+ , pero los que llegan hasta el grano. En este caso sólo aparecen las etapas de la 3 a la 5 y una semejanza en los tres tipos de riego, señalando como única diferencia que en la cuarta etapa del riego con agua y solución de Ni^{2+} se alcanzan los máximos de sodio acumulado y esto se cumple en la quinta etapa cuando el riego es con solución de Pb^{2+} .

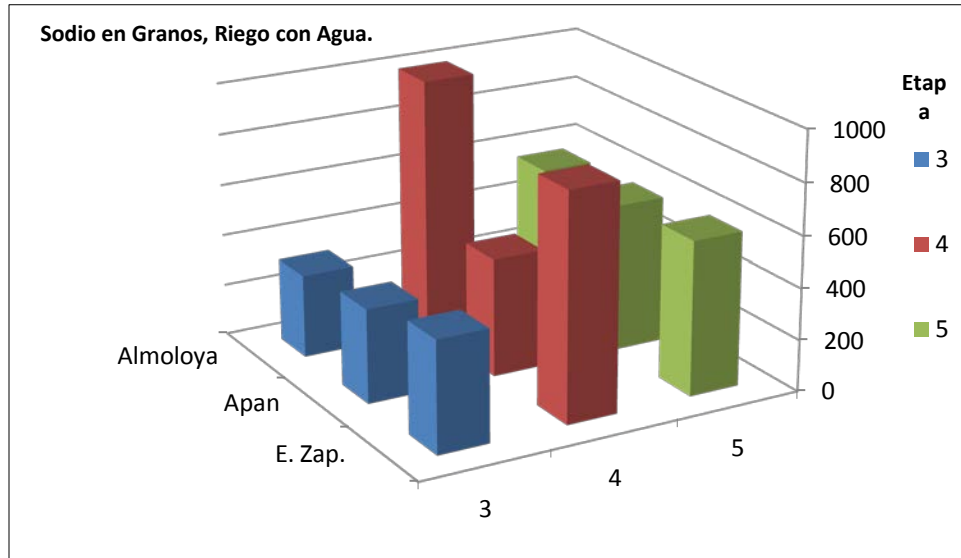


Figura VI.10.a. Contenidos de Na^+ en grano. Riego con agua.

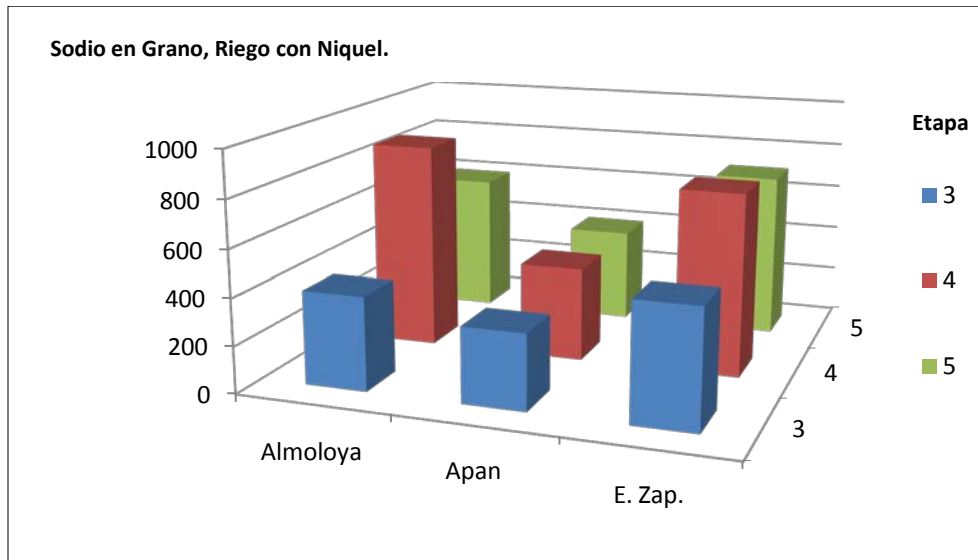


Figura VI.10.b. Contenidos de Na^+ en grano. Riego con agua contaminada con Ni^{2+} .

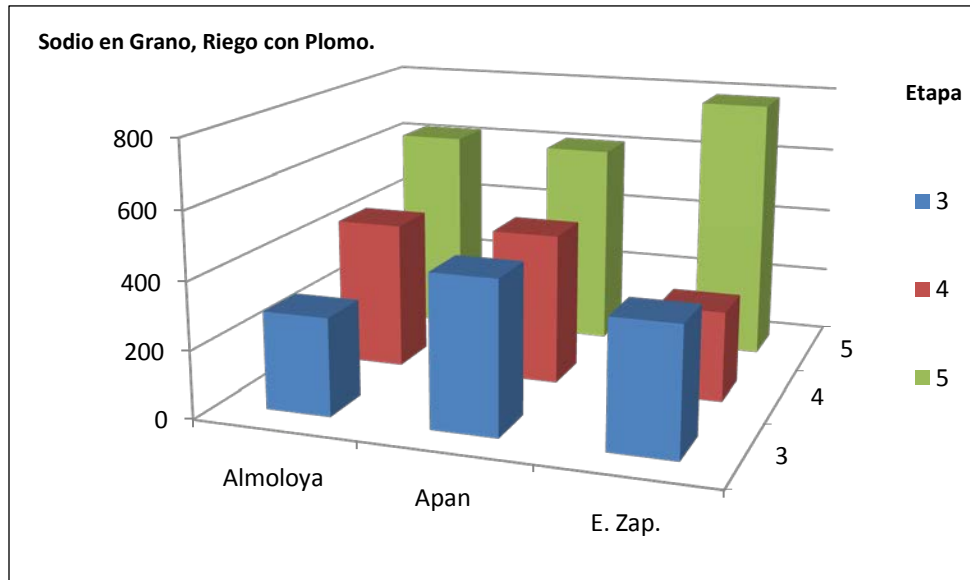


Figura VI.10.c. Contenidos de Na^+ en grano. Riego con agua contaminada con Pb^{2+} .

La figura VI.11 a, b y c, muestra el comportamiento del K^+ en raíz, que en correspondencia con lo encontrado en los suelos iniciales (muy bajos contenidos de potasio), en la primera etapa son pobres. Se observa que el riego con agua se alcanzan máximos en las etapas de la 2 a la 4 (figura VI.11 a); sin embargo en el riego con soluciones de Ni^{2+} y Pb^{2+} , en las etapas 3 y 4 bajan significativamente (figuras VI.11 b y c).

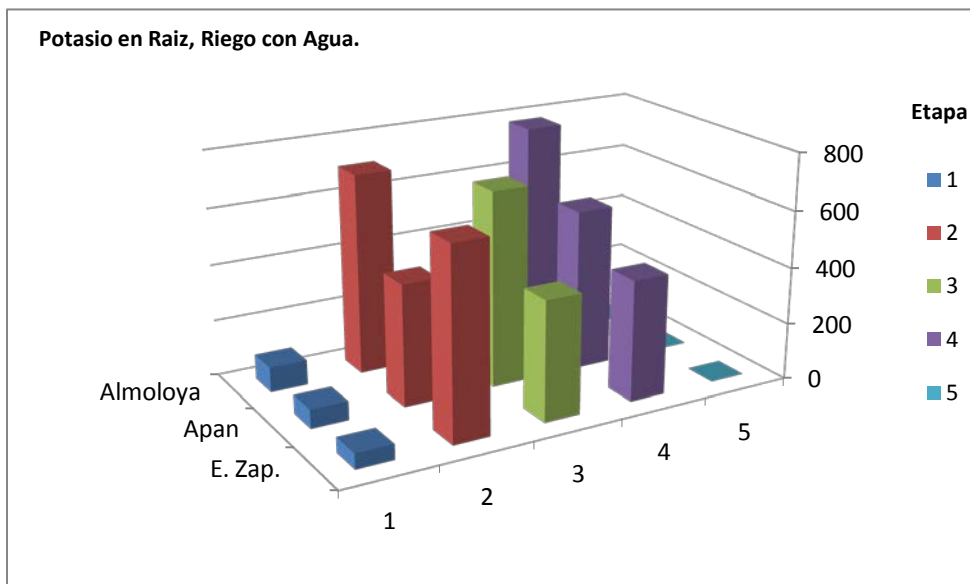


Figura VI.11 a). Contenidos de K^+ en raíz. Riego con agua.

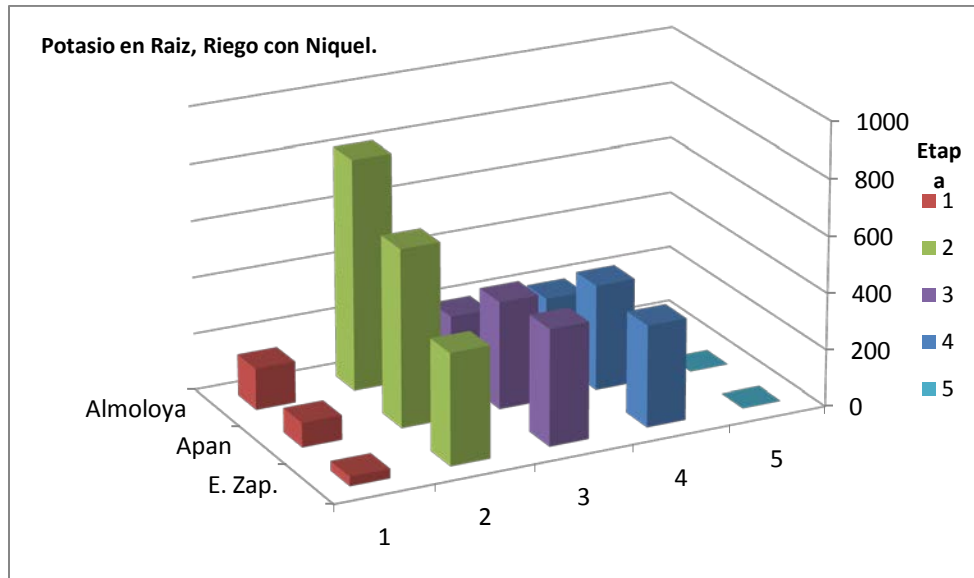


Figura VI.11 b). Contenidos de K^+ en raíz. Riego con agua contaminada con Ni^{2+} .

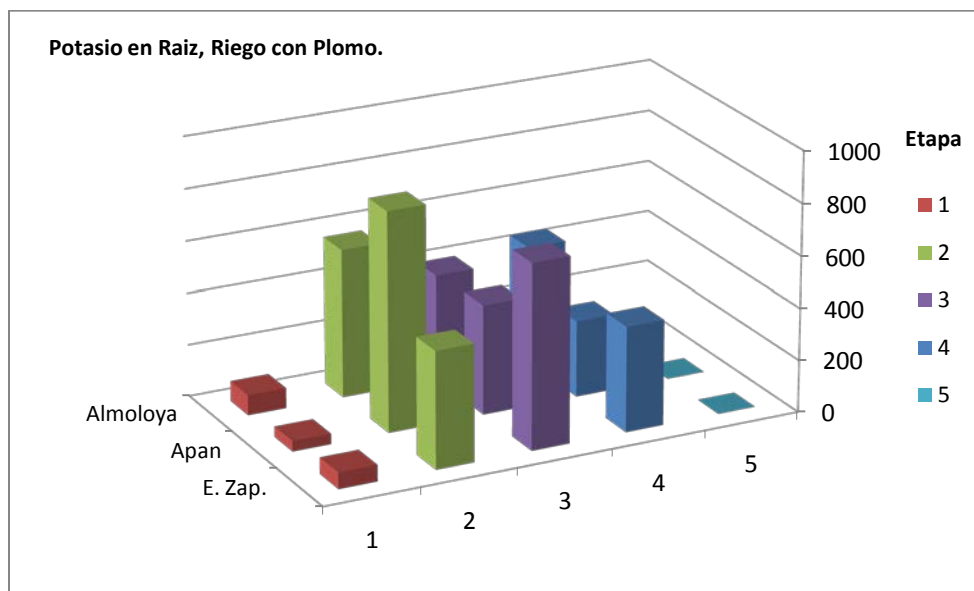


Figura VI.11 c). Contenidos de K^+ en raíz. Riego con agua contaminada con Pb^{2+} .

El K^+ presente en granos cultivados en macetas presentó un comportamiento similar para los tres tipos de riego, con máximos en la tercera etapa y solamente resaltando que los contenidos resultaron más bajos en los suelos de Almoloya (figura VI.12).

De manera similar se han evaluado otros macronutrientes como el calcio y el magnesio. Así por ejemplo el Ca^{2+} bioacumulado en granos se observa en la figura VI.13 y se compara con los contenidos de Mg^{2+} en granos, regados con agua.

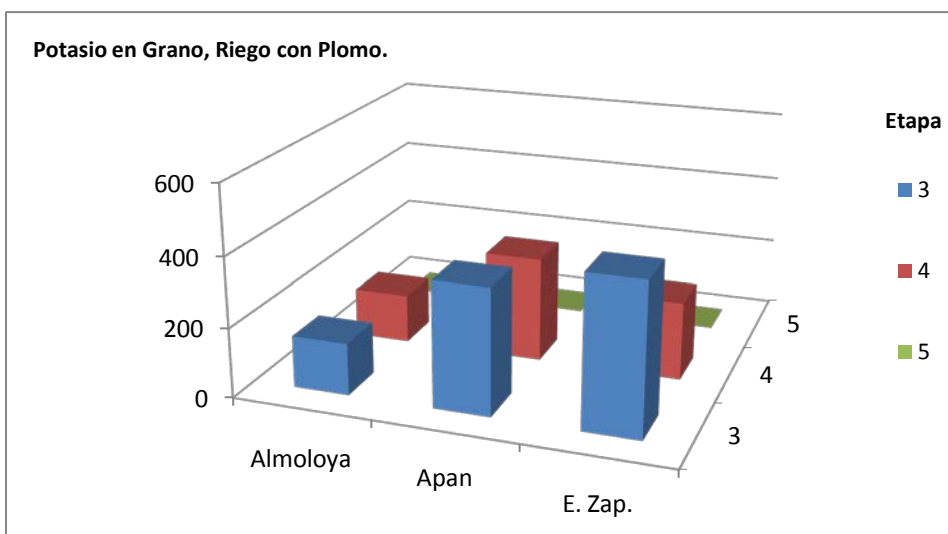
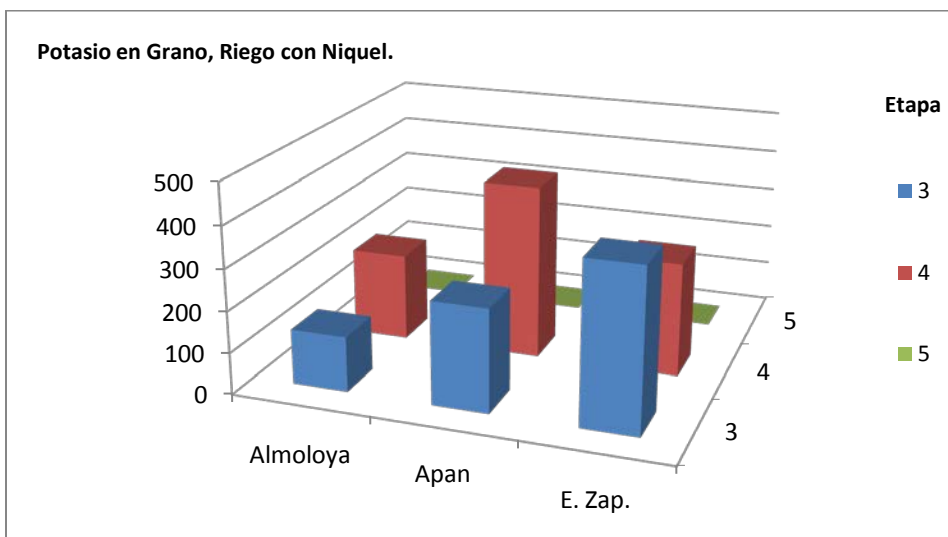
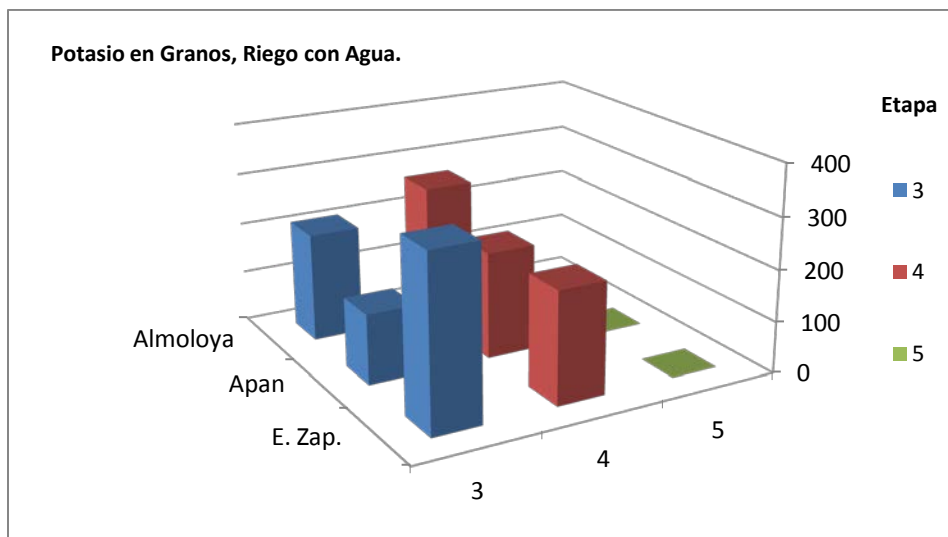


Figura VI.12. Contenidos de K^+ en granos.

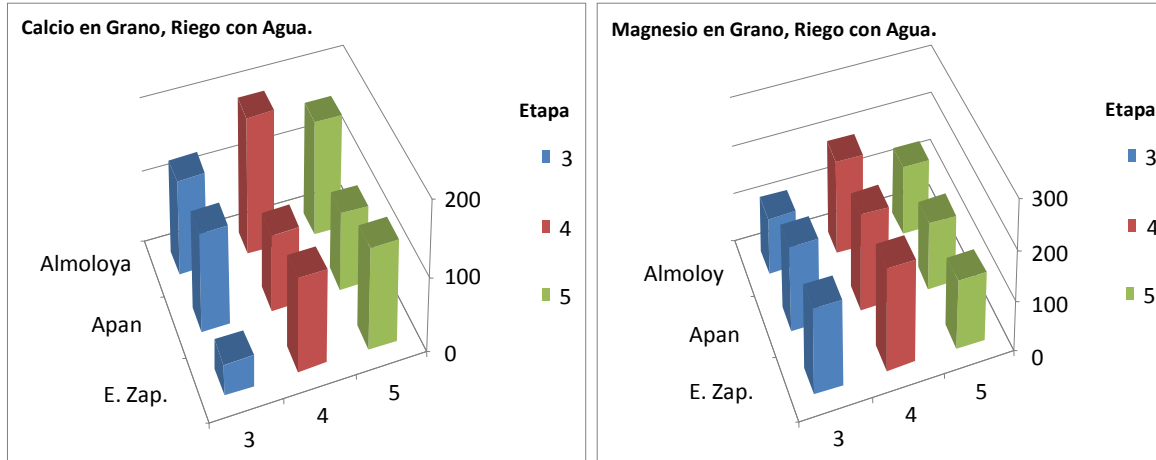


Figura VI.13. Contenedos de Ca^{2+} y Mg^{2+} en granos. Riego con agua.

Se observa claramente un comportamiento similar para ambos elementos. La figura VI.14 hace la misma comparación de calcio y magnesio bioacumulados en granos pero regados con agua contaminada con Ni^{2+} . Se aprecia la misma tendencia en ambos elementos; lo mismo ocurre en el riego con agua contaminada con Pb^{2+} . Se observa que los contenidos de Ca^{2+} se bioacumulan en las etapas 3 y 4 de manera preferencial en suelos de Almoloya en tanto que el Mg^{2+} lo hace en las mismas etapas pero en suelos de Apan y E. Zapata; esto puede asociarse a que los suelos de Almoloya presentaron mayores capacidades de intercambio y por ello mayores capacidades para intercambiar mayores niveles de Ca^{2+} . De hecho, los minerales entran en competición cuando se trata de su absorción. La administración en exceso de calcio puede inhibir la absorción de magnesio como un antagonismo.

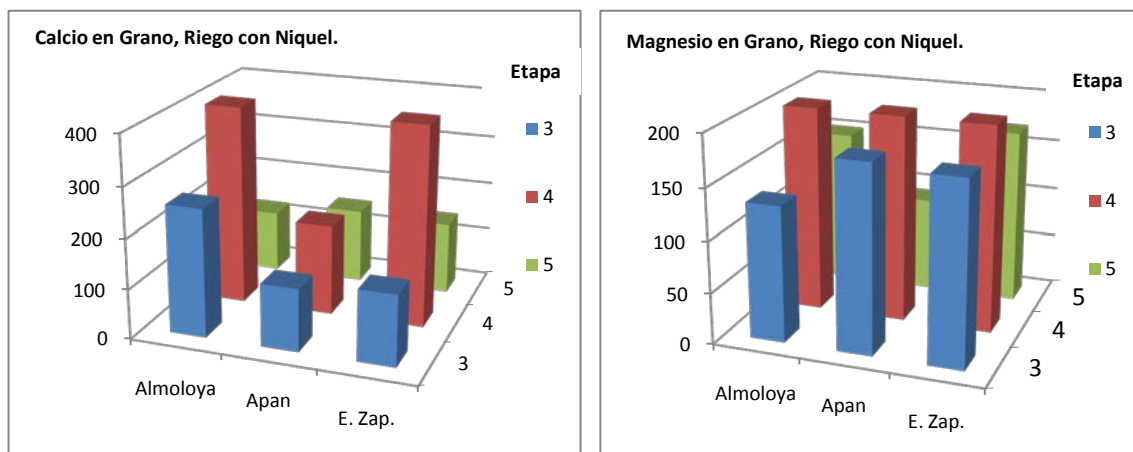
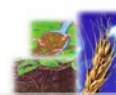


Figura VI.14. Contenedos de Ca^{2+} y Mg^{2+} en granos. Riego con agua contaminada con Ni^{2+} .

La presencia y migración del Ni^{2+} en órganos del cultivo comenzaron a detectar en los riegos con agua contaminada con este metal. De igual manera la presencia y bioacumulación de Pb^{2+} en riego con agua conteniendo este elemento. La figura



VI.15 muestra y compara la bioacumulación de Ni^{2+} en raíz, hoja y grano, en tanto la figura VI.16 compara la bioacumulación de Pb^{2+} .

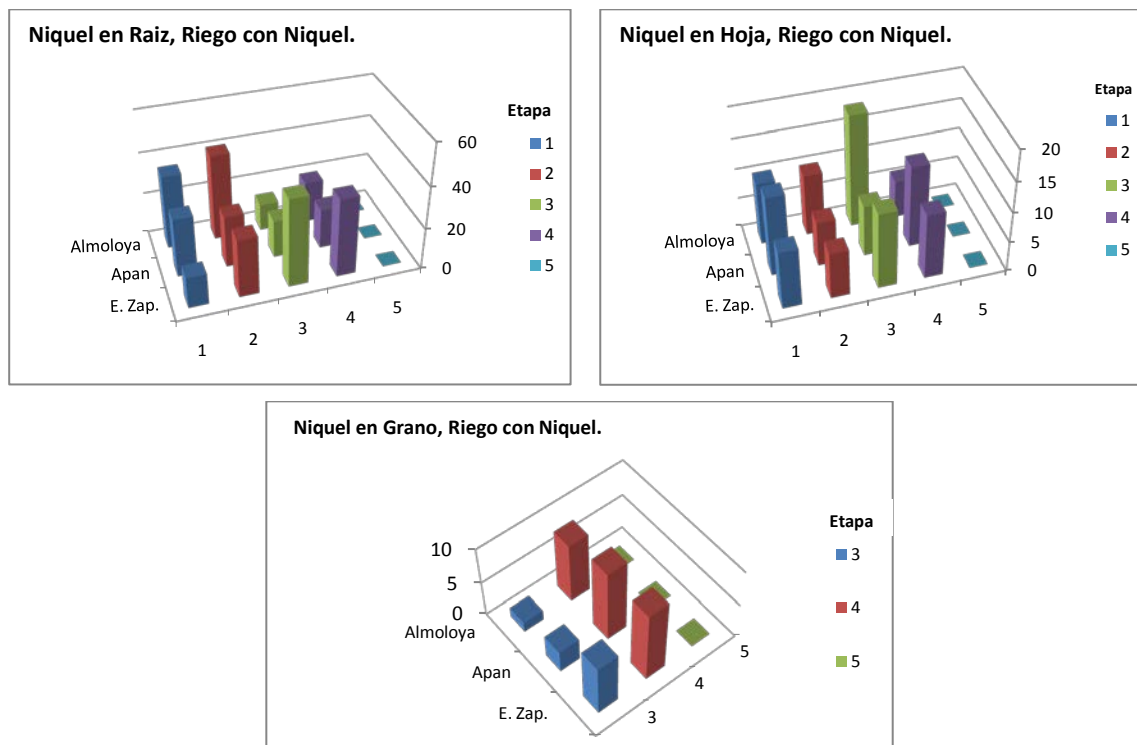


Figura VI.15. Contenidos de Ni^{2+} en raíz, hojas y granos. Riego con agua contaminada con Ni^{2+} .

Se puede apreciar que el Ni^{2+} alcanza sus máximos bioacumulados en las tres primeras etapas en raíces y hojas; por su parte en granos, es en la 4 etapa, donde se obtienen estos máximos. Es importante hacer notar que en la quinta y última etapa (cosecha de granos) no llega a estar presente el Ni^{2+} en cantidades apreciables, es decir, no constituye una afectación a la calidad del producto final (figura VI.15).

Para el caso del Pb^{2+} , se apreciaron máximos importantes en las cuatro primeras etapas en raíces, lo cual indica que este elemento es retenido por este órgano del cultivo. Observando la figura VI 16 se puede notar que los niveles de bioacumulación son significativos en hojas en la primera etapa (formación del coleóptilo o primeras hojas). En las subsiguientes etapas y en las hojas verdaderas, los niveles bioacumulados se consideran bajos. Sin embargo aparecen en cantidades muy superiores en granos lo cual indica que las hojas no almacenan este elemento y sirven como medio de transporte hacia el grano. Los contenidos de Pb^{2+} en granos resultan muy elevados para el producto lo cual atenta contra la calidad del mismo. Por otra parte, los análisis de metales por FRX de los suelos al final de los ensayos en macetas se muestran en las tablas VI.17, VI.18 y VI.19, según riegos con agua o agua contaminadas con Ni^{2+} o Pb^{2+} .

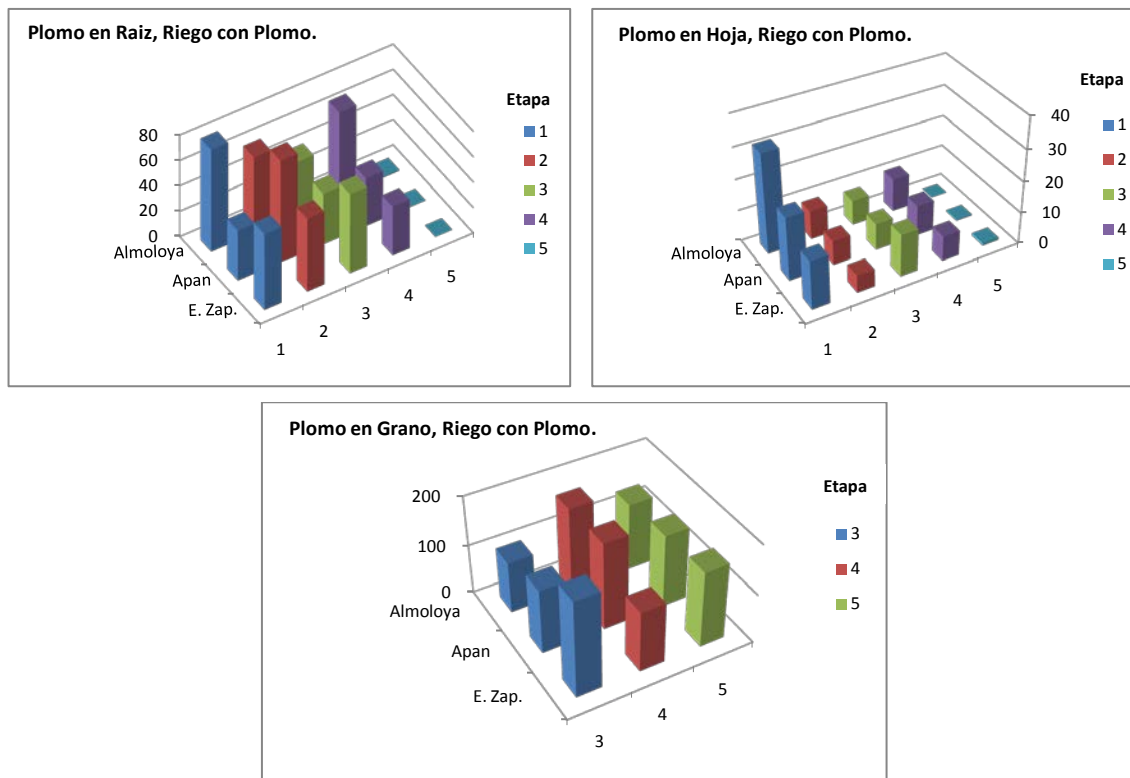
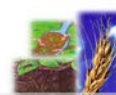


Figura VI.16. Contenidos de Pb^{2+} en raíz, hojas y granos. Riego con agua contaminada con Pb^{2+} .

Tabla VI.17. Metales en suelos de los municipios por FRX. Óxidos básicos (%m/m), metales en estudio (mg/kg) y otros metales (mg/kg), riego con agua.

Óxidos Básicos (%m/m)											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ Total	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PPC	SUMA
Almoloya											
Media	60.43	17.31	4.80	1.12	3.07	0.10	2.78	1.34	0.15	7.54	91.02
desv est	0.03	0.04	0.02	0.04	0.07	0.01	0.05	0.07	0.01	0.06	0.05
%CV	0.04	0.24	0.43	3.22	2.29	5.97	1.62	5.41	3.94	0.80	0.06
Apan											
Media	58.72	18.48	5.28	1.43	3.73	0.09	2.78	1.33	0.17	6.89	91.93
desv est	0.15	0.03	0.05	0.04	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	0.28
%CV	0.26	0.16	0.95	2.45	1.02	6.66	0.55	0.75	3.46	0.52	0.31
E. Zapata											
Media	60.12	18.35	4.68	1.57	3.94	0.08	3.17	1.24	0.12	5.71	93.22
desv est	0.47	0.12	0.13	0.03	0.03	0.01	0.04	0.01	0.02	0.10	0.43
%CV	0.77	0.63	2.84	1.91	0.67	6.93	1.28	0.81	13.09	1.76	0.46

	Metales en estudio (mg/kg) base seca				Otros metales (mg/kg) base seca					SUMA TOTAL
	Pb	Ni	Cd	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Zn	
Almoloya										
media	16.33	30.00	NR	15.60	503.67	18.33	125.33	26.33	86.00	91.84
desv est	0.58	2.00	NR	0.01	7.02	1.53	6.03	0.58	2.00	0.06
%CV	3.53	6.67	NR	0.04	1.39	8.33	4.81	2.19	2.33	0.07
Apan										
media	13.33	31.67	NR	15.59	421.00	19.67	118.67	24.67	81.33	92.66
desv est	0.58	1.53	NR	0.01	7.94	1.53	2.89	2.31	2.31	0.28
%CV	4.33	4.82	NR	0.04	1.89	7.77	2.43	9.36	2.84	0.31
E. Zapata										
media	15.33	29.33	NR	15.58	518.00	18.00	112.67	25.67	87.33	94.04
desv est	1.15	1.15	NR	0.01	2.00	1.00	2.31	1.15	1.15	0.43
%CV	7.53	3.94	NR	0.04	0.39	5.56	2.05	4.50	1.32	0.45



Como se observa y comparando con la tabla VI.8 (en suelos iniciales), no hay diferencias significativamente importantes, solo a niveles de ppm (mg/kg) en contenidos de Cr, Cu y Zn que se vieron incrementados (tabla VI.17). En el riego con agua contaminada con Ni^{2+} se observó la misma tendencia salvo el incremento de este elemento, acumulados en suelos.

Tabla VI.18. Metales en suelos de los municipios por FRX. Óxidos básicos (%m/m), metales en estudio (mg/kg) y otros metales (mg/kg), riegos con agua contaminada con Ni^{2+} .

	Óxidos Básicos (%m/m)										
Almoloya	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃ Total	MgO	CaO	MnO	Na₂O	K₂O	P₂O₅	PPC	SUMA
Media	60.89	17.07	4.92	1.12	3.07	0.12	2.62	1.14	0.15	7.38	91.04
desv est	0.45	0.11	0.04	0.02	0.07	0.01	0.07	0.02	0.01	0.04	0.43
%CV	0.74	0.65	0.71	1.55	2.17	4.95	2.76	1.82	3.77	0.59	0.47
Apan	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃ Total	MgO	CaO	MnO	Na₂O	K₂O	P₂O₅	PPC	SUMA
Media	58.36	18.21	5.23	1.79	3.75	0.09	2.75	1.33	0.17	6.77	91.63
desv est	0.14	0.06	0.09	0.02	0.04	0.00	0.04	0.02	0.02	0.09	0.21
%CV	0.24	0.31	1.63	0.85	0.96	0.00	1.47	1.57	8.81	1.37	0.23
E. Zapata	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃ Total	MgO	CaO	MnO	Na₂O	K₂O	P₂O₅	PPC	SUMA
Media	59.97	18.33	4.78	1.51	4.07	0.08	3.26	1.28	0.12	5.34	93.35
desv est	0.06	0.08	0.16	0.06	0.08	0.01	0.07	0.04	0.01	0.19	0.03
%CV	0.09	0.45	3.27	3.87	1.85	6.93	2.15	2.75	4.68	3.47	0.03

	Metales en estudio (mg/kg) base seca				Otros metales (mg/kg) base seca					
Almoloya	Pb	Ni	Cd	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Zn	SUMA TOTAL
media	15.33	39.00	NR	15.62	445.33	22.33	105.00	32.33	77.00	91.79
desv est	1.15	1.00	NR	0.01	27.65	0.58	10.44	3.06	2.65	0.42
%CV	7.53	2.56	NR	0.04	6.21	2.59	9.94	9.45	3.44	0.46
Apan	Pb	Ni	Cd	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Zn	SUMA TOTAL
media	15.00	40.67	NR	15.59	499.33	22.67	86.33	32.00	80.00	92.42
desv est	1.73	1.15	NR	0.00	2.08	1.53	4.04	2.65	2.00	0.20
%CV	11.55	2.84	NR	0.00	0.42	6.74	4.68	8.27	2.50	0.22
E. Zapata	Pb	Ni	Cd	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Zn	SUMA TOTAL
media	14.33	38.67	NR	15.58	516.67	20.00	101.67	28.67	75.00	94.16
desv est	0.58	1.15	NR	0.01	6.11	1.00	7.77	0.58	1.00	0.03
%CV	4.03	2.99	NR	0.04	1.18	5.00	7.64	2.01	1.33	0.03

VI.4.2. Análisis de lixiviados y de suelos al término de los estudios en macetas.

El comportamiento de las concentraciones de algunos metales en los lixiviados en riegos en macetas, permiten realizar un balance material de dicho elemento:

$$SALIDA_{(en\ lixiviado)} = ENTRADA_{(en\ riego)} - ACUMULADO_{(en\ suelos)} - BIOACUMULADO_{(en\ \acute{o}rganos\ del\ cultivo)} + LIXIVIADO_{(suelos)}$$

Así por ejemplo se pudo correlacionar el comportamiento del Ca^{2+} que se muestra en la figura VI.17. Se aprecia que durante los primeros 5 riegos aproximadamente, las concentraciones de Ca^{2+} presentaron una tendencia a disminuir en los lixiviados, lo cual corresponde con su acumulación en suelos en proporción con su CIC. Entre el sexto y octavo riego los niveles de concentración presentaron poca variación, correspondiendo con un nivel de bioacumulación e incremento en órganos del cultivo (granos en la cuarta etapa). Posteriormente, en los dos últimos riegos (noveno y décimo) se presenta un incremento del Ca^{2+} en los lixiviados, lo cual se corresponde con que los suelos ya no intercambian más y los órganos del cultivo han consumido sus cantidades requeridas. Este comportamiento es similar al del Mg^{2+} (figura VI.18), y de manera muy parecida se observó en el riego con



agua contaminada con Ni^{2+} y Pb^{2+} . Esto también podría estar además asociado a la probable hidrólisis de los feldespatos.

Tabla VI.19. Metales en suelos de los municipios por FRX. Óxidos básicos (%m/m), metales en estudio (mg/kg) y otros metales (mg/kg), riegos con agua contaminada con Pb^{2+} .

	Óxidos Básicos (%m/m)										
Almoloya	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3 Total	MgO	CaO	MnO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	PPC	SUMA
Media	61.51	17.23	4.42	1.12	3.07	0.09	2.67	1.32	0.17	5.14	91.55
desv est	0.03	0.04	0.06	0.03	0.04	0.01	0.05	0.03	0.02	0.08	0.08
%CV	0.05	0.21	1.32	2.24	1.15	6.66	1.88	1.91	8.81	1.65	0.09
Apan	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3 Total	MgO	CaO	MnO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	PPC	SUMA
Media	58.49	18.29	5.25	1.74	3.68	0.09	2.76	1.34	0.17	6.97	91.75
desv est	0.20	0.13	0.04	0.03	0.03	0.01	0.07	0.02	0.01	0.09	0.28
%CV	0.35	0.70	0.83	1.72	0.68	6.66	2.46	1.14	3.33	1.36	0.30
E. Zapata	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3 Total	MgO	CaO	MnO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	PPC	SUMA
Media	59.43	18.19	4.73	1.51	3.91	0.08	3.29	1.22	0.12	5.86	92.42
desv est	0.11	0.18	0.05	0.03	0.07	0.01	0.07	0.03	0.01	0.05	0.01
%CV	0.18	0.97	1.06	1.67	1.81	15.06	2.14	2.46	9.90	0.85	0.01

	Metales en estudio (mg/kg) base seca				Otros metales (mg/kg) base seca					
Almoloya	Pb	Ni	Cd	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Zn	SUMA TOTAL
Media	18.33	29.00	NR	15.59	477.33	16.33	97.00	28.00	71.33	92.30
desv est	0.58	1.00	NR	0.01	18.58	1.15	1.73	1.00	1.15	0.06
%CV	3.15	3.45	NR	0.04	3.89	7.07	1.79	3.57	1.62	0.06
Apan	Pb	Ni	Cd	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Zn	SUMA TOTAL
Media	20.67	29.67	NR	15.59	504.33	16.33	81.67	30.00	73.33	92.52
desv est	2.08	1.53	NR	0.01	7.57	1.53	3.06	2.00	0.58	0.27
%CV	10.07	5.15	NR	0.04	1.50	9.35	3.74	6.67	0.79	0.29
E. Zapata	Pb	Ni	Cd	Mn	Ba	Co	Cr	Cu	Zn	SUMA TOTAL
Media	17.67	29.00	NR	15.58	506.33	17.00	88.67	27.67	71.33	93.19
desv est	0.58	1.73	NR	0.01	6.51	2.00	6.11	1.15	1.53	0.01
%CV	3.27	5.97	NR	0.07	1.29	11.76	6.89	4.17	2.14	0.01

Nota: PPC, pérdidas por calcinación, equivalentes a MO; NR. No reportadas.

Por su parte el comportamiento del Na^+ presentó una tendencia similar en los suelos de Apan y Almoloya, no así en los suelos de E. Zapata, en los que se apreció una tendencia al aumento de concentración con el aumento de riegos, es decir, se apreció una especie de lavado del Na^+ lo que se corresponde con el suelo de mayor salinidad y menor CIC (figura VI.19). También podría estar asociado a la hidrólisis de las plagioclasas de sodio.

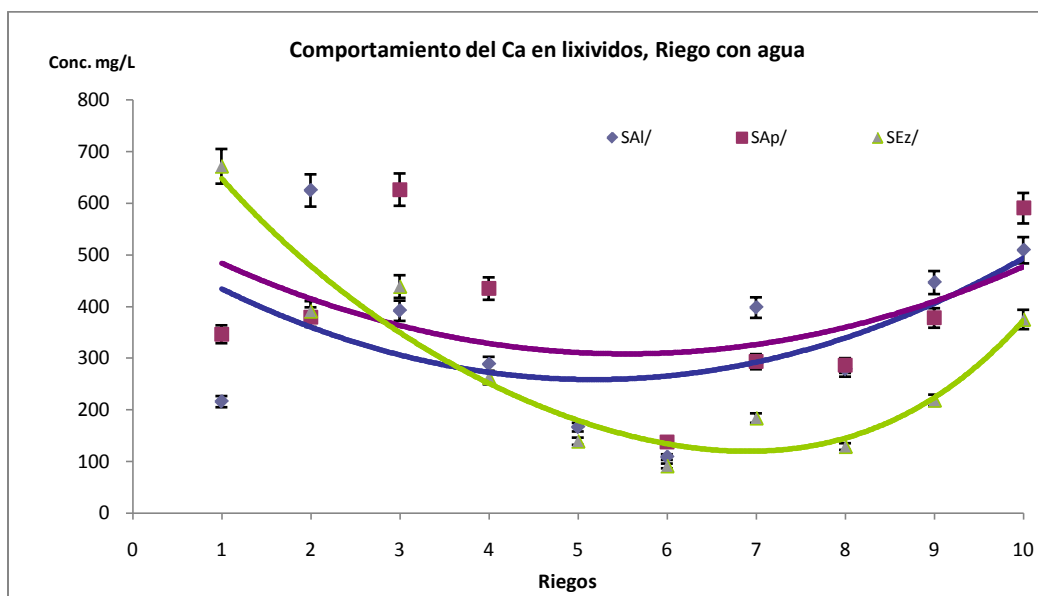


Figura VI.17. Comportamiento del Ca^{2+} en lixiviados obtenidos del riego con agua en los ensayos en macetas.

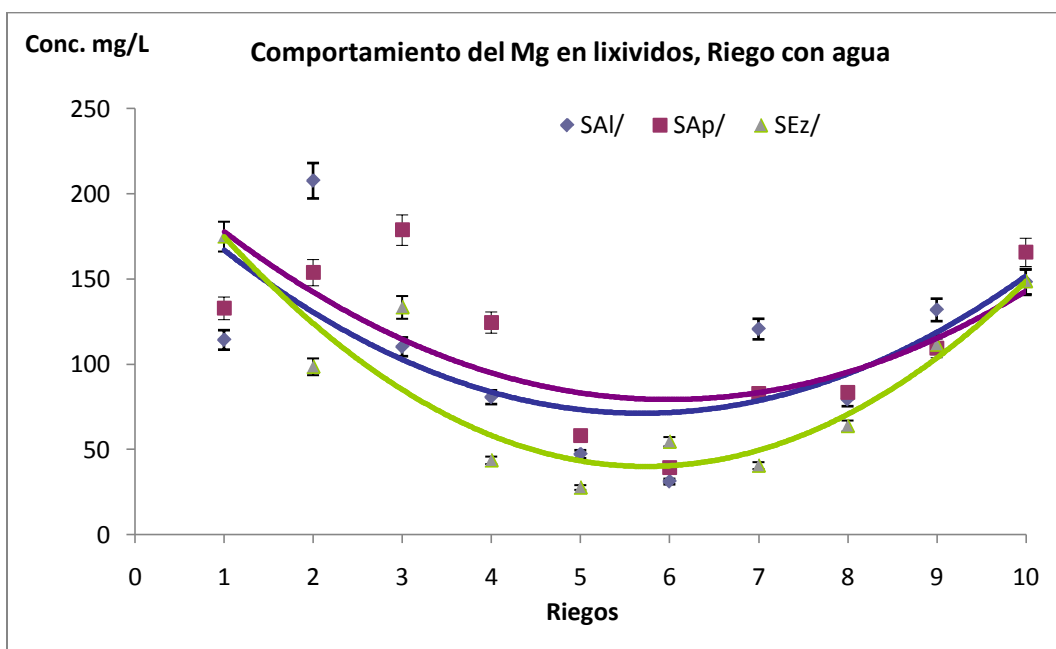


Figura VI.18. Comportamiento del Mg^{2+} en lixiviados obtenidos del riego con agua en los ensayos en macetas.

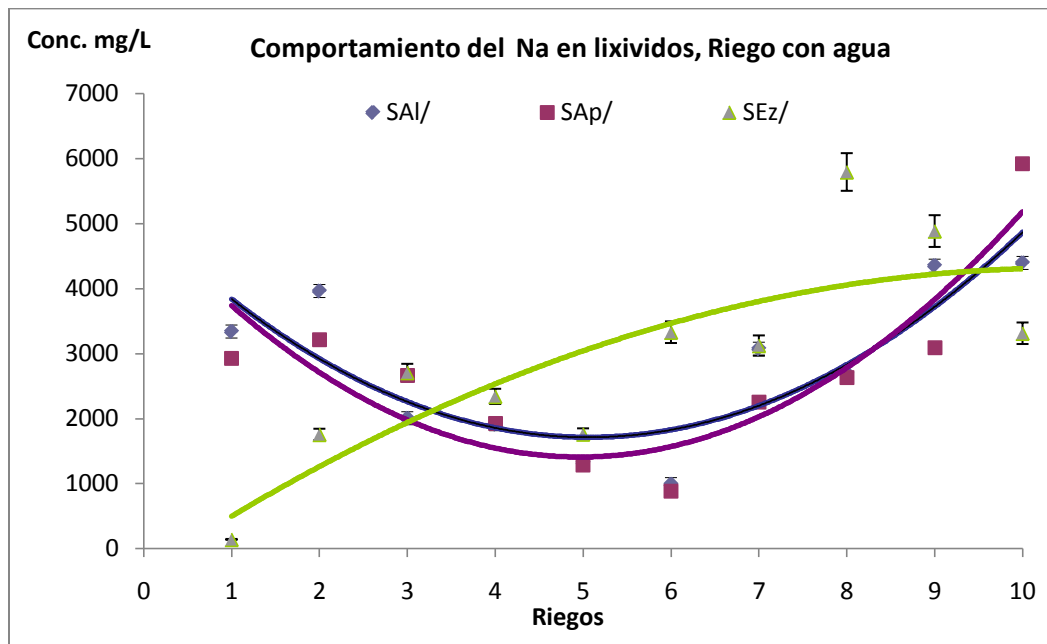


Figura VI.19. Comportamiento del Na^+ en lixiviados obtenidos del riego con agua en los ensayos en macetas.

VI.5. Conclusiones de los estudios en macetas.

La baja retención de humedad en general para los tres suelos, puede provocar poca germinación al inicio del cultivo, igualmente provoca poca humidificación de la baja concentración de materia orgánica, lo cual indica que una baja germinación puede ser causa de que bajen los niveles de rendimientos del cultivo.

Los bajos contenidos de potasio (K) que presentan los suelos de los tres municipios también resultan poco favorables para el cultivo de cebada que requiere concentraciones elevadas de dicho metal, en sus primeras etapas de desarrollo. Resulta igualmente perjudicial para el rendimiento del cultivo.

Los altos contenidos en sodio, manifestaron una tendencia a ir en aumento en las diferentes fases o etapas de desarrollo del cultivo, siendo ésta una tendencia atípica para este cultivo donde se conoce que el ritmo de absorción de materias minerales en la cebada es muy elevado al comienzo de la fase vegetativa, disminuye después hasta llegar a anularse.

De los metales como el Níquel y el Plomo sólo se observó su presencia en el cultivo en los casos de donde se regó con agua contaminada con los mismos. En el caso del plomo se observó una tendencia a ser absorbido más ampliamente por la raíz que el caso de Níquel; esto conllevó a apreciar una mayor migración de este elemento a otros órganos del cultivo, llegando a encontrarse concentraciones importantes de plomo en grano, no así de níquel. Esto puede considerarse una



afectación que limitaría la calidad del cultivo para la producción de malta y cerveza (rechazo de la producción).

Para el caso de los metales Cadmio y Manganeseo se observó su presencia en el cultivo en los casos de donde se regó con agua contaminada con los mismos. Para el Cadmio se observó una tendencia a ser absorbido por la raíz que el caso de Manganeseo; esto ocurre de manera similar a lo que se observó para plomo y níquel. De manera un tanto diferente que en el caso del níquel, se pudo apreciar una mayor migración del Manganeseo a otros órganos del cultivo, llegando a encontrarse concentraciones importantes de manganeseo en hojas y en grano.

El manganeseo en grano no resulta un peligro contaminante que origine el rechazo de la producción de cebada. Su presencia en órganos del cultivo se asocia con las condiciones climáticas que pueden llegar a afectar la disponibilidad y asimilación de nutrimentos, así, por ejemplo, en baja radiación solar se reduce la asimilación de manganeseo. Se reporta que la presencia de manganeseo en granos de cebada, cuando se está en presencia de niveles fitotóxicos de dichos elementos, implica mayor traslocación hacia la parte aérea de la planta (Mendoza, 1997).

Los cereales son particularmente sensibles a las deficiencias de dos microelementos: Manganeseo y Cobre. En cuanto a la deficiencia en manganeseo, la cebada es más sensible que el trigo. Los síntomas de la deficiencia de Manganeseo en las hojas de los cereales se presentan con pequeñas diferencias en el aspecto según especie y variedad, pero en general, se manifiesta siempre mediante una clorosis más o menos continua entre las nervaduras, dando un aspecto de rayas y estrías. También pueden aparecer manchas oscuras sobre las hojas. Las condiciones de suelo más propicias a las deficiencias de Manganeseo son los pH altos y una elevada aireación del suelo. La adición manganeseo que se realizó en los ensayos en macetas, realmente muestran un saldo favorable más que contaminante.

El efecto del cadmio en las semillas de cebada inhibe la germinación de semillas, y mostraron importantes efectos inhibitorios sobre las raíces y el crecimiento del coleóptilo después de la germinación. El efecto del cadmio en la raíz y el crecimiento del coleóptilo fueron más pronunciados que la de la germinación.

VI.6. Análisis proximales por órganos de la planta cultivada en parcelas y por municipios.

Como se explicó las muestras del cultivo de cebada fueron tomadas en los municipios de Almoloya, Apan y Emiliano Zapata, al momento de la cosecha que realizan los productores de la región. Para el municipio de Almoloya se tomaron las parcelas P1, P2 y P3; (figura VI.20) corresponden a los campos de estas parcelas.

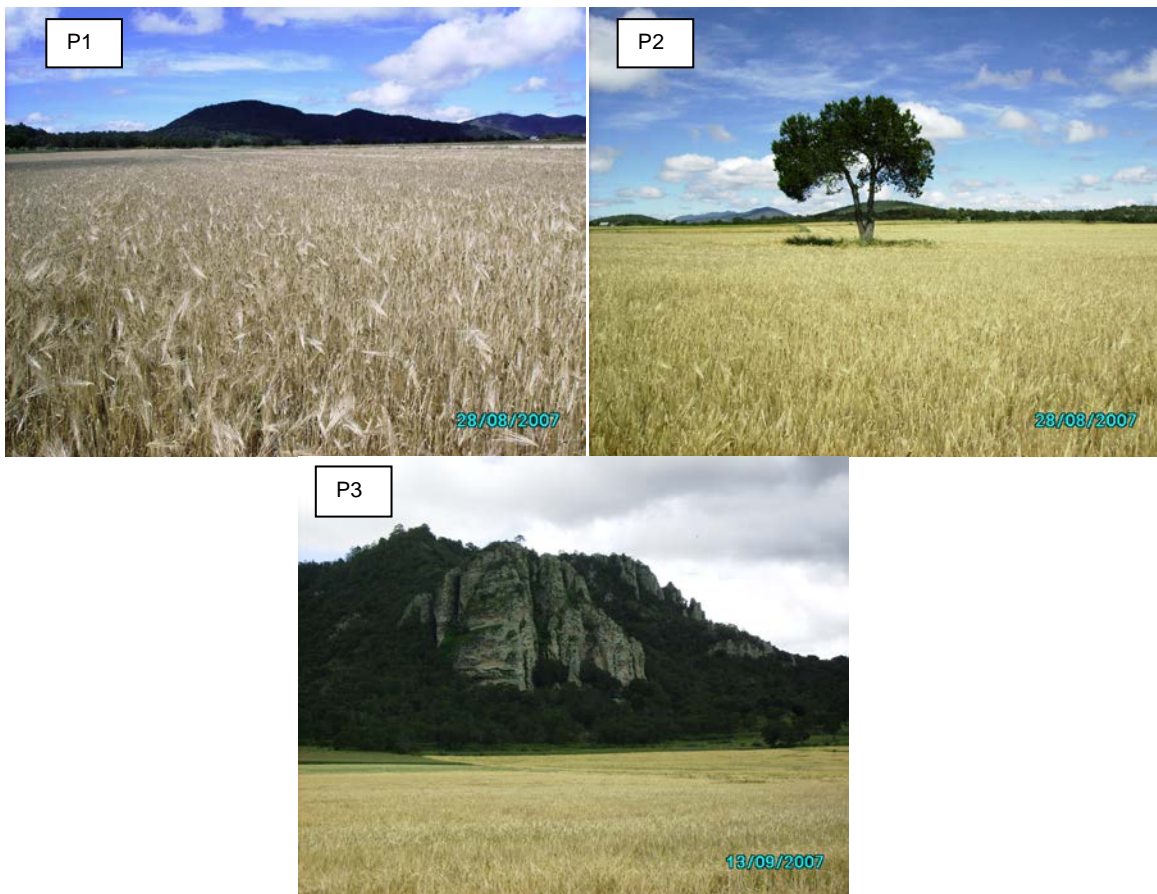


Figura VI.20. Parcelas del municipio de Almoloya. Arriba, a la izquierda la parcela P1, La Vega; a la derecha la parcela P2, El Sabinal; debajo la parcela P3, La Peña.

En las fotografías (figuras VI.21 y VI.22), se observan otros momentos o aspectos relevantes durante las faenas de recolección de muestras. Por ejemplo se puede observar la maquinaria que se encontraba trabajando en la cosecha (trillando) en la parcela P4 del municipio Apan, otra fotografía muestra como las parcelas de Apan y Emiliano Zapata se encuentran en las orillas de carreteras por las que hay normal circulación vehicular, esto puede dar origen a ciertos criterios de contaminación ambiental de estos cultivos.

Otras fotos (figura VI.23) muestran las diferencias entre los cultivos de cebada de seis y dos hileras de granos en las espigas, a pesar de que en todos los casos se tomó muestra de la variedad Esmeralda.



Figura VI.21. Parcelas del municipio de Apan. A la izquierda la parcela P4 del Tío Chano; se hace notar que estaba siendo trillada; a la derecha la parcela P5, La Panadera.

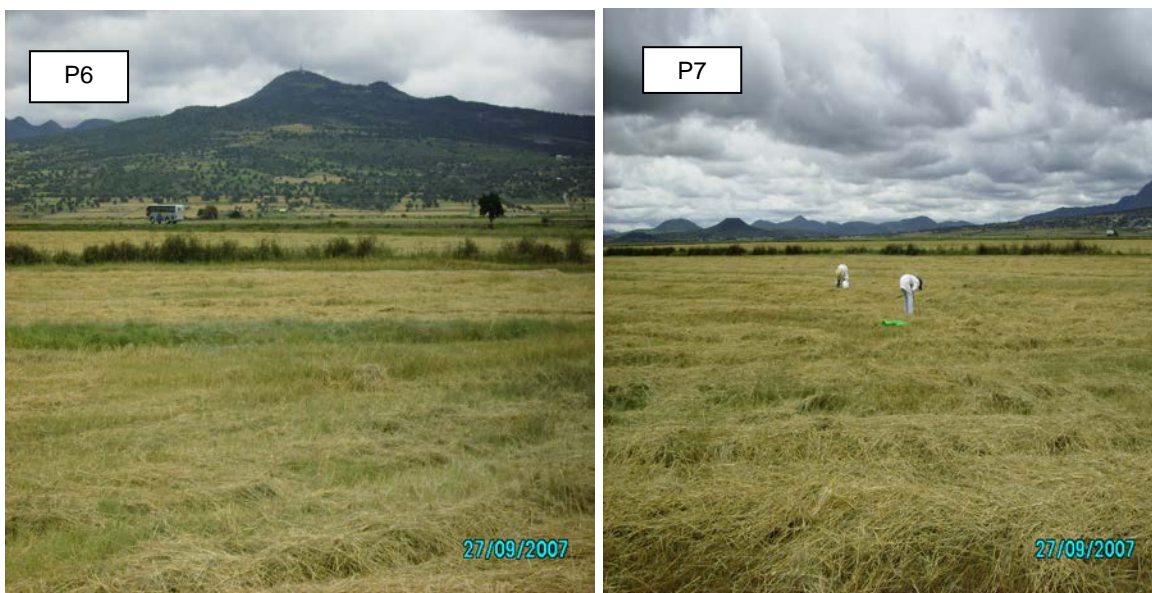
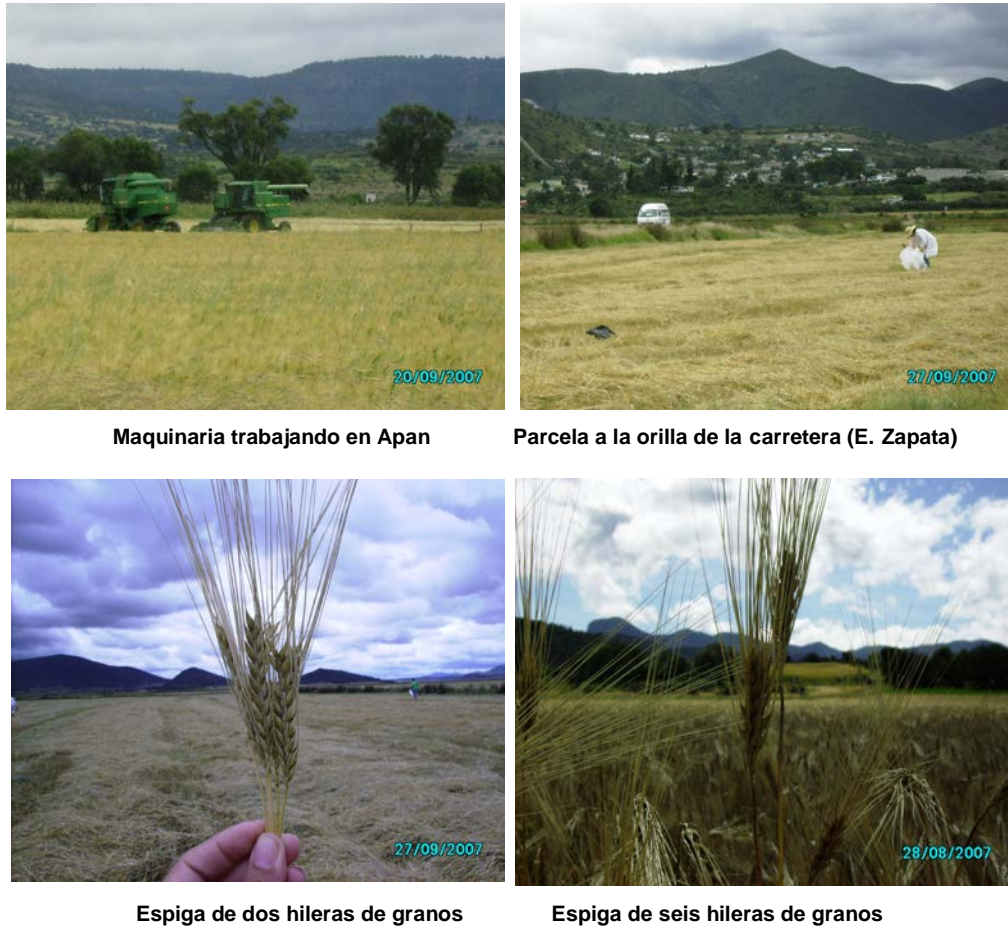


Figura VI.22. Parcelas del municipio de Emiliano Zapata. A la izquierda la parcela P6; se hace notar que estaba recién trillada; a la derecha la parcela P7.



Maquinaria trabajando en Apan

Parcela a la orilla de la carretera (E. Zapata)

Espiga de dos hileras de granos

Espiga de seis hileras de granos

Figura VI.23. Otras incidencias durante la recolección de muestras.

En las tablas VI.20., VI.2. y VI.22., se presentan los resultados promedio de los análisis de humedad en órganos del cultivo, recolectados de la cosecha por cada municipio. Al analizar por órganos del cultivo, comenzando por la raíz, órgano que está en contacto directo con la humedad disponible del suelo, se observa que coincide en el mismo orden que se encontró la humedad en suelos siendo una raíz más húmeda las de los cultivos de Apan y Almoloya y en menor cuantía al cultivo de Emiliano Zapata. Esto obedece igualmente a las características de texturas de estos mismos suelos, siendo los de E. Zapata de textura más arenosa y con ello presentan una menor capacidad de retener la humedad en el suelo.

Tabla VI.20. Humedad en cultivo de cebada por órganos. Municipio Almoloya.

HUMEDAD CEBADA PROMEDIO MUNICIPIO (ALMOLOYA)					
%H ₂ O					
Réplica	RAIZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANOS
1	5.36	4.51	5.04	7.13	7.21
2	5.25	4.51	5.04	7.34	7.09
3	5.50	4.53	5.00	7.30	7.15
Media	5.37	4.52	5.03	7.26	7.15
des est	0.11	0.01	0.02	0.09	0.05
%CV	1.96	0.14	0.35	1.21	0.72

**Tabla VI.21.** Humedad en cultivo de cebada por órganos. Municipio Apan.

HUMEDAD CEBADA PROMEDIO MUNICIPIO (APAN)					
%H ₂ O					
Réplica	RAIZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANOS
1	5.66	5.66	5.73	4.57	12.11
2	7.28	4.41	5.04	5.56	13.89
3	5.74	4.96	5.30	5.45	11.37
Media	6.22	5.01	5.35	5.19	12.46
des est	0.75	0.51	0.28	0.45	1.056
%CV	11.96	10.23	5.29	8.58	8.49

Tabla VI.22. Humedad en cultivo de cebada por órganos. Municipio Emiliano Zapata.

HUMEDAD CEBADA BONILLA (EMILIANO ZAPATA)					
%H ₂ O					
Réplica	RAIZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANOS
1	4.19	4.47	5.28	6.03	7.91
2	3.95	5.58	4.27	5.36	7.42
3	4.58	4.12	5.97	5.49	7.40
Media	4.24	4.72	5.17	5.63	7.58
des est	0.26	0.62	0.70	0.29	0.24
%CV	6.13	13.14	13.46	5.18	3.11

Sin embargo, para las hojas el orden de humedad remanente en las mismas al momento de la colecta fue inverso a las raíces: E. Zapata > Almoloya > Apan. Esto indica que hubo una mayor madurez en la cosecha (secado natural del cultivo para quedar dispuesto para las máquinas cosechadoras) en Apan y menor en E. Zapata. Para los tallos por su parte el comportamiento de la humedad almacenada fue equivalente en los tres municipios siendo de un 5% aproximadamente para todos.

Para las espigas se pudo apreciar diferencias en los valores de humedades entre los tres municipios. Almoloya con la mayor humedad remanente en promedio, seguido de E. Zapata y por último de Apan. Esto indica nuevamente mayor madurez del cultivo a la hora de la colecta para Apan que para E. Zapata que Almoloya. Sin embargo debe hacerse notar que los granos de cebada cultivados en Apan presentaron los mayores niveles de humedad acumulada, lo cual puede deberse a que justamente en este municipio se consideren, por mayor peso en granos, mayores rendimientos de cosecha.

De todo este análisis, se puede inferir que de acuerdo a los contenidos de agua reportada para el follaje, identificado como paja (parte área del cultivo en fase seca, lista para la recolecta, es decir, hojas, tallos y espigas) que oscila entre 14-15% según los autores (Dendy *et* Dobraskczyk, 2004), los valores encontrados en los municipios corresponden, con la sola excepción del cultivo en Almoloya que presentó una humedad total para estos órganos cercana al 17% (tabla VI.23).

Tabla VI.23. Humedad promedio del follaje en su totalidad (%)

HUMEDAD %	ALMOLOYA	APAN	E. ZAPATA
Hojas	4.52 ^a	3.67 ^b	4.72 ^a
Tallos	5.03 ^a	5.35 ^b	5.17 ^a
Espigas	7.26 ^a	4.86 ^b	5.63 ^c
Total	16.80^a	13.89^b	15.52^c

Letras diferentes en filas indican diferencias significativas ($p < 0.05$)



Para los granos del cultivo, que son definitivamente el producto básico final para la industria maltera (Islas, 2004), sus contenidos de humedad óptimos al momento de la cosecha pueden llegar como máximo al 14% (Dendy *et* Dobraskczyk, 2004). De la observación de las tablas VI.18, VI.19 y VI.20 se puede apreciar que para los tres municipios este valor osciló entre 7.15% y 10.79%, correspondiendo el valor promedio más elevado al municipio de Apan.

En las tablas VI.24, VI.25 y VI.26 se presentan los resultados promedio del porcentaje de Cenizas por órganos del cultivo y por municipio.

Después de la absorción de metales por las raíces de los vegetales, estos quedan disponibles para ser bioacumulados en los distintos órganos del cultivo (García *et* Dorronsoro, 2005). Las plantas pueden acumular elementos, especialmente trazas de elementos tóxicos o peligrosos que pueden ser transferidos al hombre o a los animales. Existen factores, además de la textura del suelo, que afectan la capacidad de las plantas para acumular elementos metálicos; factores tales como: la especie vegetal (unas especies son muy sensibles mientras que otras son muy tolerantes), el órgano de la planta, (generalmente los granos suelen contener concentraciones menores de elementos metálicos que otros órganos vegetales) y las prácticas agrícolas, como la aplicación de fertilizantes o riego con agua residual (Abollino *et al.*, 2002).

Los resultados de la calcinación de los órganos del cultivo de la planta, ya secos y a elevadas temperaturas da como resultados los contenidos de cenizas. Estos contenidos de cenizas se han de corresponder de manera aproximada a los contenidos de los óxidos metálicos bioacumulados por dichos órganos.

Como se aprecia los contenidos de cenizas en la raíz variaron de 12 a 30%, resultando en la raíz del cultivo en el municipio Apan el contenido más elevado; por su parte los contenidos de cenizas en hoja oscilaron entre 9-12%. Esto indica que entre estos dos órganos, los niveles de metales bioacumulados (vistos en forma de óxidos) en raíces son mayores. De manera similar sucede con los óxidos de metales bioacumulados en tallos, que oscilaron entre 5-6%, resultando valores relativamente bajos.

Tabla VI.24. Porcentaje de cenizas por órganos del cultivo de cebada en el municipio de *Almoloya*.

CENIZAS CEBADA PROMEDIO MUNICIPIO (ALMOLOYA)					
%Cenizas					
RÉPLICA	RAIZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANOS
1	12.73	12.55	4.28	13.45	2.44
2	13.15	12.50	5.41	12.72	2.24
3	12.87	10.76	5.56	15.71	1.70
Media	12.92	11.93	5.082	13.96	2.13
des est	0.17	0.83	0.57	1.275	0.32
%CV	1.33	6.95	11.30	9.13	14.81



Tabla VI.25. Por ciento de cenizas por órganos del cultivo de cebada en el municipio de Apan.

CENIZAS CEBADA PROMEDIO MUNICIPIO (APAN)					
%Cenizas					
RÉPLICA	RAIZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANOS
1	32.56	7.87	5.90	14.72	3.30
2	30.60	11.90	6.03	13.63	4.65
3	26.23	10.39	5.95	15.41	3.28
Media	29.80	10.05	5.96	14.59	3.74
des est	2.65	1.66	0.05	0.73	0.64
%CV	8.88	16.55	0.90	5.01	17.04

Tabla VI.26. Por ciento de cenizas por órganos del cultivo de cebada en el municipio de E. Zapata.

CENIZAS CEBADA BONILLA (EMILIANO ZAPATA)					
%Cenizas					
RÉPLICA	RAIZ	HOJA	TALLO	ESPIGA	GRANOS
1	10.89	10.50	5.79	16.54	1.52
2	18.87	8.37	6.37	16.43	1.26
3	7.47	10.16	6.05	11.27	1.18
media	12.41	9.68	6.07	14.75	1.32
des est	4.77	0.93	0.24	2.46	0.14
%CV	38.47	9.63	3.88	16.65	10.79

Esto se ve incrementado al llegar a la espiga donde los contenidos de cenizas se elevan a valores entre 14-15%. Esto es indicativo de su traslocación desde las raíces hacia las espigas sirviendo el tallo como vía de su migración y cierta retención en tejidos de las hojas; esto corresponde con los reportado por Kabata-Pendias (Kabata-Pendias, 2000).

En granos se ha podido apreciar que los contenidos de cenizas oscilan entre 1-3% lo que corresponde con lo reportado (Dendy *et al.*, 2004). Sin embargo, estos mismos autores señalan que para el follaje en su conjunto (hojas, tallos y espigas), los contenidos de cenizas pueden alcanzar valores de hasta 4-5%. Llama la atención que en este estudio se han encontrado valores que en suma varían entre 21-30%, es decir entre 5 y 6 veces superiores a la cifra reportada. Es de suponer por tanto, que existen niveles de bioacumulación de elementos metálicos por encima de los valores convencionalmente esperados, asociados a prácticas sistemáticas de aplicaciones de fertilizantes y/o encalado de suelos, como se ha indicado y además al material parental.

El ritmo de absorción de materias minerales en la cebada es muy elevado y sobre todo al comienzo de la fase vegetativa, disminuyendo después hasta llegar a anularse, habiéndose observado incluso, en algunos casos, excreciones radiculares de la vegetación (Lasat, 200; Lazzari *et al.*, 2001; López *et al.*, 2005).

Resulta significativo observar que efectivamente es en raíces, hojas y espigas donde se producen las mayores bioacumulaciones de los óxidos metálicos asociados con las cenizas y que en los tallos es menor debido a su función de servir como vía de translocación más que de bioacumulación.



También se observó que existe correspondencia con lo indicado por los autores que reportan que granos es menor la bioacumulación. Resulta destacable como en las raíces del cultivo en Apan (tabla VI.25) los valores resultaron muy elevados.

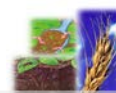
En las tablas VII.27., VII. 28. Y VII. 29., se presentan los resultados promedio de Proteínas y Nitrógeno según el método de Dumas. La respuesta al nitrógeno puede variar con el periodo de crecimiento del cultivo, la variedad de la cebada, el nitrógeno disponible en el suelo, que se relaciona con el nitrógeno residual del cultivo anterior y con las condiciones climáticas. Hay que tener en cuenta no hacer aportaciones excesivas de nitrógeno, ya que es muy sensible al encamado. También hay que considerar que en las cebadas cerveceras la mayor proporción de nitrógeno disminuye la calidad (García *et* Dorronsoro, 2005) y motiva el rechazo de la producción para tales fines.

Los dos problemas principales conocidos como fisiopatías o daños en el cultivo, que pueden presentarse durante el proceso de cosecha de la cebada son el encamado y la rotura del cuello de la espiga, lo cual suele ocurrir ya en las etapas finales del desarrollo del cultivo. Esto es un problema fundamental que atenta contra los rendimientos. El encamado se produce cuando la planta, una vez espigada, se tumba al doblarse los tallos por la parte inferior. El uso de variedades con tallo recio y corto evita este accidente; aunque la aplicación de elevadas dosis de potasio y nitrógeno y fuertes precipitaciones puede hacer que ninguna variedad sea resistente. Los efectos del encamado sobre el rendimiento y calidad del grano pueden ser muy importantes. Al observar las fotografías de las figuras VI.20, VI.21 y VI.22, parcelas de Almoloya, Apan y E. Zapata, se puede apreciar que el Almoloya no se detectaron problemas de encamado, en Apan, si se observó cierta tendencia en la parcela P4 en tanto que en E. Zapata en todos los caso si fue observado el problema de encamado.

Por su parte la rotura del cuello de la espiga tiene lugar durante la fase de llenado del grano o después de la madurez fisiológica; pueden tener gran incidencia en la disminución de la capacidad productiva del cultivo. Aunque suele tener un origen genético, la rotura del cuello con caída de la espiga una vez que la planta está seca, suele proceder del retraso excesivo en la cosecha. Esto también se observó en las parcela de E. Zapata.

En las tablas VI.27, VI.28 y VI.29 se muestran los resultados en % de Nitrógeno y % de proteínas por órganos del cultivo. Evidentemente para este estudio resultan de sumo interés los contenidos que se encontraron en granos. Por una parte, los contenidos de nitrógeno expresados como porcentaje de proteínas en las raíces oscilaron entre 8-9%; en hojas, entre 7-10%, en tallos entre 6-7% y en espigas entre 5-7%.

Para los granos los valores de porcentajes en nitrógeno proteico variaron entre 9-12%, siendo realmente contenidos idóneos para fines de la producción de cerveza. Cabe destacar en este sentido que los contenidos mayores se presentaron en el municipio de Emiliano Zapata. Esto coincide con informaciones



recibidas de los productores, quienes comentan las necesidades de aplicaciones de dosis de fertilizantes con el propósito de elevar los rendimientos. También se corresponden estos resultados con los suelos de peores calidades para este cultivo, las parcelas de más bajos rendimientos y se corresponden además con los niveles de rechazo más elevados, además de los problemas indicados con encamado y rotura del cuello de las espigas.

Tabla VI.27. Porciento de Nitrógeno y proteína por órganos del cultivo de cebada en el municipio de Almoloya.

PROMEDIO, MUNICIPIO ALMOLOYA										
RÉPLICA	RAÍZ		TALLO		HOJA		ESPIGA		GRANO	
	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína
1	1.20	7.01	1.05	6.16	1.05	6.15	0.78	4.54	1.58	9.25
2	1.35	7.88	0.91	5.30	1.04	6.06	0.75	4.40	1.68	9.85
3	1.53	8.96	1.04	6.06	1.36	7.98	1.11	6.46	1.69	9.89
Media	1.36	7.95	1.00	5.84	1.15	6.73	0.88	5.14	1.65	9.66
Des. Est	0.17	0.98	0.08	0.47	0.19	1.08	0.20	1.15	0.06	0.36
%CV	12.28	12.29	8.05	8.05	16.10	16.10	22.46	22.41	3.70	3.70

Tabla VI.28. Porciento de Nitrógeno y proteína por órganos del cultivo de cebada en el municipio de Apan.

PROMEDIO, MUNICIPIO APAN										
RÉPLICA	RAÍZ		TALLO		HOJA		ESPIGA		GRANO	
	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína
1	1.26	7.40	1.18	6.93	1.63	9.56	1.26	7.37	1.64	9.62
2	1.67	9.75	1.30	7.60	1.66	9.74	1.32	7.71	1.91	11.15
3	1.71	9.98	1.09	6.30	1.69	9.82	1.18	6.90	1.84	10.75
Media	1.55	9.04	1.19	6.94	1.66	9.71	1.25	7.32	1.80	10.50
Des. Est	0.25	1.43	0.11	0.65	0.03	0.13	0.07	0.40	0.14	0.80
%CV	15.82	15.82	8.88	9.31	1.74	1.37	5.52	5.52	7.58	7.58

Tabla VI.29. Porciento de Nitrógeno y proteína por órganos del cultivo de cebada en el municipio de E. Zapata.

BONILLA, MUNICIPIO EMILIANO ZAPATA										
RÉPLICA	RAÍZ		TALLO		HOJA		ESPIGA		GRANO	
	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína	% Nitrógeno	% Proteína
1	1.34	7.83	1.03	6.04	1.18	6.91	1.15	6.76	1.94	11.36
2	1.36	7.98	0.93	5.47	1.55	9.06	1.10	6.45	2.16	12.66
3	2.07	12.09	0.94	5.49	1.47	8.62	1.00	5.83	2.06	12.05
Media	1.59	9.30	0.97	5.66	1.40	8.20	1.08	6.34	2.06	12.02
Des. Est	0.41	2.42	0.06	0.33	0.20	1.14	0.08	0.47	0.11	0.65
%CV	25.97	25.98	5.75	5.75	13.89	13.87	7.40	7.39	5.38	5.38

También es importante recordar que el potasio aumenta la calidad cervecera y la resistencia al encamado. La extracción media de la cebada en elementos nutritivos (NPK), por hectárea y por tonelada producida, debe ser de aproximadamente 2.6% de N, 2.0% de P y 2.5% de K (Dendy *et* Dobraskczyk, 2004). Según García y Dorrnsoro (2005) la aplicación de azufre por vía foliar durante el ahijado mejora la utilización de los recursos hídricos del suelo por la cebada e incrementa el número de espigas/planta. Su efecto se asemeja al de un regulador del crecimiento que estimula el ahijamiento, suplementando la acción del nitrógeno o ejerciendo un efecto aditivo sobre la dosis del mismo. Sin embargo, esta práctica no es usual en estos municipios. En la siguiente tabla



(tabla VI.30) se muestran los valores promedio de cada municipio obtenidos en la medición de grasas de los granos de Cebada.

Tabla VI.30. Porcentaje de grasa en granos del cultivo de cebada en el municipio de Almoloya.

% Grasa en 1g de granos de Cebada.			
RÉPLICA	Almoloya	Apan	E. Zapata
1	0.98	1.00	1.09
2	0.95	0.96	1.14
3	0.86	0.98	0.98
Media	0.93	0.98	1.07
Desv.Est	0.06	0.02	0.08
%CV	6.67	2.04	7.65

Como se observa los contenidos en grasa en granos cosechados oscilaron entre 0.93 y 1.07% para los tres municipios, resultando el promedio de las parcelas del municipio de E. Zapata el que más elevado valores presentó. Esto se corresponde con lo indicado por Dendy y Dobraskczyk (Dendy *et* Dobraskczyk, 2004) quienes indican que para la cebada maltera este valor es en promedio menor de 1.8-2.0%.

Los resultados de fibra en los órganos del cultivo se muestran en las tablas VI.31, VI.32 y VI.33 para cada municipio.

Tabla VI.31. Porcentaje de fibras por órgano del cultivo de cebada en el municipio Almoloya.

Almoloya					
% de Fibra.					
Réplica	Raíz	Tallo	Hoja	Espiga	Grano
1	2.70	12.41	1.57	1.60	1.60
2	2.67	12.09	1.47	1.50	1.44
3	2.87	12.16	1.43	1.46	1.43
Media	2.76	12.22	1.49	1.52	1.48
Desv.Est	0.12	0.17	0.08	0.07	0.10
%CV	4.28	1.37	5.06	4.83	6.67

Tabla VI.32. Porcentaje de fibras por órgano del cultivo de cebada en el municipio Apan.

Apan					
% de Fibra.					
Réplica	Raíz	Tallo	Hoja	Espiga	Grano
1	2.70	12.64	1.87	2.92	0.97
2	2.69	13.92	1.76	3.30	1.07
3	2.87	13.17	1.67	3.28	1.1
Media	2.75	13.24	1.77	3.17	1.05
Desv.Est	0.10	0.64	0.10	0.21	0.07
%CV	3.67	4.86	5.67	6.75	6.50

Tabla VI.33. Porcentaje de fibras por órgano del cultivo de cebada en el municipio E. Zapata.

Emiliano Zapata					
% de Fibra.					
Réplica	Raíz	Tallo	Hoja	Espiga	Grano
1	2.71	12.43	1.53	1.73	1.73
2	2.68	12.16	1.47	1.63	1.66
3	2.89	12.13	1.42	1.59	1.58
Media	2.76	12.24	1.47	1.65	1.66
Desv.Est	0.12	0.17	0.06	0.07	0.08
%CV	4.19	1.35	3.75	4.37	4.53



Los contenidos en fibras resultaron similares para las raíces del cultivo (entre 2.70-2.80%), para los tallos (entre 12.2-13.2%) y para hojas (1.50-1.70%) en los tres municipios. No se aprecian diferencias significativas en los contenidos de fibras en estos órganos, salvo con la excepción de los contenidos en espigas. En este caso los contenidos en fibras variaron entre 1.50-1.65% en los cultivos de Almoloya y E. Zapata, pero en las espigas del municipio de Apan representaron el doble de estas cantidades (3.30%).

En este sentido los resultados fueron en orden inverso para los granos, resultando con menores contenidos en fibras los granos del cultivo en Apan (1.05%) que los de Almoloya y E. Zapata (1.49% y 1.66%, respectivamente).

Los contenidos de carbohidratos se muestran en la tabla VI.34. En todos los casos se puede observar que los contenidos de carbohidratos se incrementan de la raíz, tallo, a las hojas; posteriormente, disminuyen en las espigas y vuelven a incrementar en los granos. Para los contenidos de los carbohidratos totales en raíces, tallos y espigas resultaron significativamente menores en los cultivos de Apan que en los otros dos municipios; sin embargo resultaron mayores en las hojas. Por su parte los porcentajes encontrados en granos fueron similares para todos los casos.

Los contenidos en metales bioacumulados (sólo evaluados sodio, potasio, calcio y magnesio en mg/kg) se muestran en la figura VI.24, VI.25 y VI.26. En las mismas se puede apreciar que los mayores contenidos corresponden al sodio (Na) bioacumulado (figura VI.24) y seguido de los contenidos de calcio (figura VI.25) y de magnesio (figura VI.26). Se puede indicar que la presencia de potasio (K) fue mínima y solamente detectable en hojas y tallos. Estos contenidos tan bajos de potasio en los órganos de los cultivos y en los tres municipios, están en correspondencia con los bajos contenidos que se reportaron en los suelos.

Tabla VI.34. Porcentaje de carbohidratos por órganos del cultivo

Muestra		RAÍZ	TALLO	HOJA	ESPIGA	GRANO
		% Carbohidratos	% Carbohidratos	% Carbohidratos	% Carbohidratos	% Carbohidratos
ALOMOLOYA	Media	63.49 ^a	70.81 ^a	73.84 ^a	70.62 ^a	78.07 ^a
	Des. Est	3.26	6.33	4.60	5.11	4.87
	%CV	5.13	8.94	6.23	7.23	6.24
APAN	Media	52.44 ^b	68.57 ^a	74.58 ^a	65.33 ^b	78.35 ^a
	Des. Est	3.57	5.09	2.98	5.74	3.95
	%CV	6.80	7.43	4.00	8.78	5.04
E. ZAPATA	Media	69.49 ^c	70.45 ^a	71.84 ^a	70.62 ^a	76.47 ^b
	Des. Est	4.34	5.93	4.60	4.46	4.87
	%CV	6.24	8.41	6.40	6.31	6.37

Es importante destacar que el Na se bioacumula de forma preferencial en las raíces. Posteriormente es trasladado a través de los tallos a las hojas, espigas y granos. De la figura VI.24 llama la atención los incrementos de Na bioacumulado que se observó en hojas y espigas para los municipios de Apan y E. Zapata. Esto se puede corresponder con el mayor grado de madurez en la cosecha para los municipios de Almoloya y Apan. El sodio bioacumulado en la cebada verde ayuda a mantener el equilibrio osmótico celular, lo mismo que el potasio.



En la bioacumulación del Ca (figura VI.25) se pudo observar la misma tendencia en los tres municipios, siendo más elevada en raíces, disminuyendo en tallos (órgano para transporte), aumenta en hojas y nuevamente vuelve a disminuir discretamente hasta los mínimos en granos.

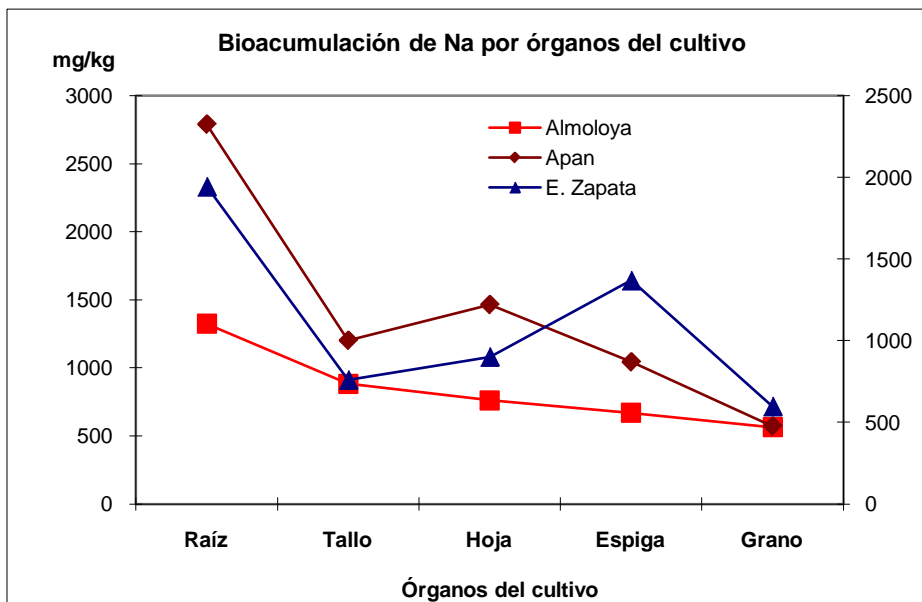


Figura VI.24. Bioacumulación de sodio por órganos del cultivo en promedio y por municipios.

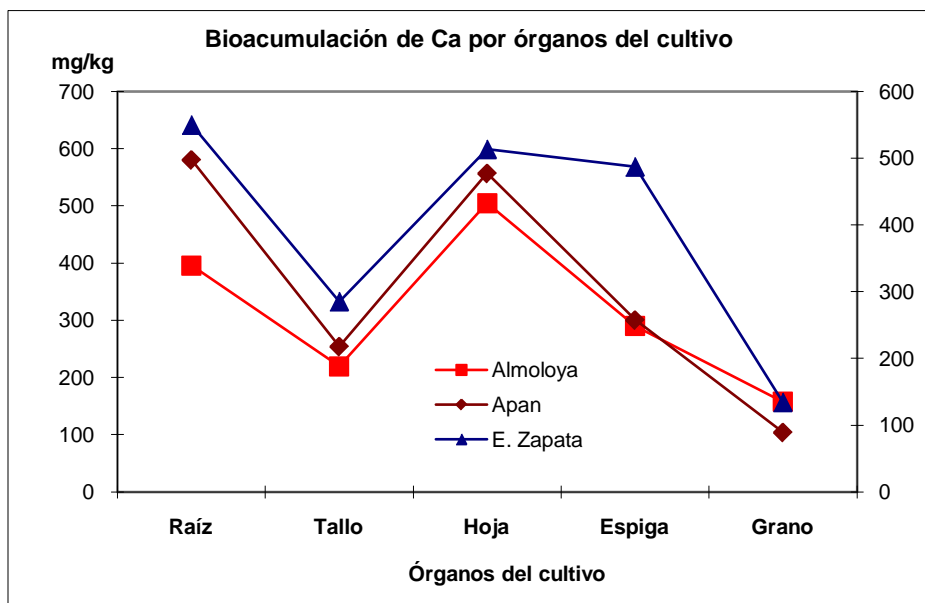


Figura VI.25. Bioacumulación de calcio por órganos del cultivo en promedio y por municipios.

Tanto para la bioacumulación de sodio como para calcio se apreció que en los cultivos de Almoloya se presentan los menores valores. Así mismo, en la



bioacumulación del Mg (figura VI.26). Para este último es distinguible que en las hojas ocurre un nivel de acumulación de Mg igual en los cultivos de los tres municipios. Estas apreciaciones son correspondientes con lo señalado por algunos autores (Fancelli, 2006; Flores, 2008).

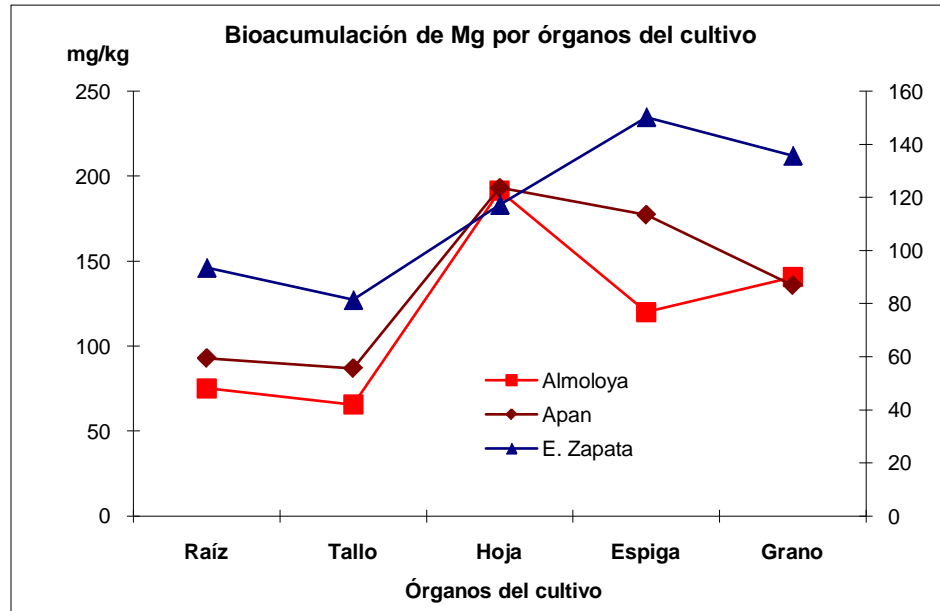


Figura VI.26. Bioacumulación de magnesio por órganos del cultivo en promedio y por municipios.

VI.7. Conclusiones de los estudios de caracterización de cultivos cosechados en parcelas.

Se ha evaluado el cultivo de cebada maltera en los municipios de Apan, Almoloya y Emiliano Zapata de manera integral por medio de análisis proximales y se ha podido determinar por órganos del cultivo y al momento de la cosecha, su composición, lo que ha permitido valorar cuales de sus constituyentes presentan algún contenido relevante que afecte a la calidad del producto. Estos resultados, unidos a los criterios previamente obtenidos de las caracterizaciones de los suelos donde son cosechados estos cultivos, han permitido llegar a criterios sobre qué aspectos están incidiendo en afectaciones a la calidad maltera y al incremento de los niveles de rechazo de estos productos.

En atención a los resultados se puede concluir que se tiene un mayor grado de madurez en la cosecha (por secado natural del cultivo para quedar dispuesto para las máquinas cosechadoras) en Apan que en Almoloya que en E. Zapata. Este criterio coincide con las más afectadas calidades de los suelos en este mismo orden.

Los niveles de absorción de materias minerales en la cebada cultivada en los tres municipios resultan muy elevados y al parecer se produce al comienzo de la fase vegetativa, por aplicaciones de fertilizantes y algunas prácticas de encalado. Esto



se manifiesta por los altos contenidos de cenizas (como óxidos metálicos que son bioacumulados en órganos del cultivo). Se han encontrado valores que en suma varían entre 21-30%, es decir entre 5 y 6 veces superiores a las cifras reportadas como normales.

Los resultados de Nitrógeno proteico, a pesar de haber resultado en valores idóneos para los granos de cebada con calidad maltera, deben ser reportados como el resultado de aplicaciones de fertilizantes en los inicios de la etapa vegetativa, por cuanto los contenidos de nitrógeno disponible en los suelos resultaron muy bajos ya que no son retenidos en ellos como se ha demostrado en trabajos anteriores; esto debido a las características franco arenosas que hoy en día presentan los mismos.

Se puede considerar de lo anterior que el uso continuado de un sistema de monocultivo por más de 40 años en estos municipios ha propiciado serios cambios de las texturas de los suelos. Por ello hay relativos bajos valores de materia orgánica disponible, bajos contenidos de nitrógeno y bajas capacidades de retención de agua y de intercambio catiónico.

La composición proximal por contenidos en fibras, grasas y carbohidratos pueden considerarse sin afectaciones y normales. Sin embargo en cuanto a contenidos metálicos se concluye que en niveles de sodio y calcio resultan elevados, lo que está en correspondencia con los altos contenidos en cenizas y al parecer las prácticas de aplicaciones de fertilizantes inorgánicos y de encalado de suelos y el material parental.

Por otra parte se concluye que los niveles de potasio resultan despreciables, lo cual fue observado en todos los órganos del cultivo: esto se corresponde con los despreciables niveles en suelos y además, esta carencia de potasio puede provocar una disminución en la calidad cervecera y una disminución de las variedades cultivadas a la resistencia al encamado.

Se puede concluir que las afectaciones al rendimiento en las cosechas por fisiopatías de encamado se deban no a los niveles de nitrógeno sino a la carencia de potasio. Lo mismo que ocurre en cuanto a los índices de rechazo por no cumplir la calidad maltera exigida.

VI.8. Establecimiento de indicadores e índices de calidad del cultivo de cebada maltera (ICCM) en la región sur del estado de Hidalgo.

Para realizar la evaluación de la calidad de granos de cebada maltera cosechada del sur del estado de Hidalgo, teniendo en cuenta el número de indicadores mínimos que se propusieron, se han establecido los indicadores e índices que se observan en la tabla VI.35.



Tabla VI.35. Indicadores propuestos para evaluación de calidad de los granos de cebada maltera.

Indicador	U.M.	ICCM	
		Máx.	Mín.
Humedad	%	15.0	6.0
Densidad Peso Hectolitro	Kg/HL	78	65
Materia grasa	%	2.0	0.1
Proteína	%	12.0	8.0
Fibras dietéticas totales	%	7.0	1.0
Cenizas totales	%	5.0	0.5
Poder germinativo	%	100	85

Para la obtención de un valor único de cada parámetro se realizó también un promedio ponderado de acuerdo a la proporción que se presentó en los cultivos estudiados a la hora de la recolecta. Los indicadores seleccionados fueron igualmente normalizados en una escala 0-1 que representan también, la peor y mejor condición desde el punto de vista de la calidad para los granos, independientemente de valores absolutos medidos. Se consideraron las mismas expresiones para dos situaciones posibles: cuando el valor máximo del indicador ($I_{m\acute{a}x}$) corresponde a la mejor calidad del grano:

$$V_n = (I_m - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad \text{Ecuación 3.}$$

y cuando el valor $I_{m\acute{a}x}$ corresponde a la peor situación de calidad de los granos de cebada:

$$V_n = 1 - (I_m - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde los significados son los mismos antes detallados: V_n = valor normalizado, I_m = medida del indicador, $I_{m\acute{a}x}$ = valor máximo del indicador, $I_{m\acute{i}n}$ = valor mínimo del indicador.

Para los atributos de las condiciones óptimas, se tuvieron en cuenta umbrales definidos por los productores de maltas y cervezas mientras que en otros casos se utilizaron criterios teóricos. Se estableció un índice de calidad de cebada maltera (ICCM) al promediar los valores de todos los indicadores. Para la interpretación del ICCM se utilizó una escala de transformación; que en este caso se propuso en tres clases de calidad de granos (de 1 a 3) que se muestra en la Tabla VI.36.

Tabla VI.36. Clases de calidad de granos para cebada maltera.

Índice de calidad de granos de cebada.	Escala	Clase	Criterios
Excelente calidad	0.90 – 1.00	1	Calidad o grado México, según NMX-FF-043-SCFI-2003.
Alta calidad	0.80 – 0.89	1	Calidad o grado México.
Moderada calidad	0.70 – 0.79	2	Aceptado por la industria maltera con penalización, o conocido como grado México no certificado.
Media calidad	0.60 – 0.69	3	Uso como Adjuntos en la industria maltera.
Baja calidad	< 0.59	4	Uso como Adjuntos o como forraje.

En la Tabla VI.37 se presentan los valores normalizados de los indicadores calculados y el índice de calidad de cebada maltera (ICCM), resultante por cada municipio. El indicador que presentó el menor valor en promedio para los tres



municipios, fue el porcentaje de humedad (0.42), mientras que el mayor valor correspondió a los contenidos de materia grasa (0.91). En general con la excepción de los contenidos de humedad (mínimos) y materia grasa (máximos), el resto de los indicadores oscilaron entre 0.64 y 0.81. El promedio general de la calidad de los granos de cebada maltera que se cultivan en la región sur del estado de Hidalgo fue de 0.69. De acuerdo a la clasificación por clases que se ha propuesto (tabla VI.36), se puede entender que los granos de cebada son de moderada a baja calidad.

Tabla VI.37. Indicadores e índices de calidad de granos de cebada maltera (ICCM) por municipios.

Indicador	Valores de los indicadores			ICCM
	Apan	Almoleya	E. Zapata	Promedio
Humedad	0.91 ^a	0.15 ^b	0.21 ^c	0.42
Densidad Peso Hectolitro	0.76 ^d	0.74 ^d	0.46 ^e	0.65
Materia grasa	0.84 ^f	0.92 ^g	0.97 ^g	0.91
Proteína	0.67 ^h	0.63 ^h	0.80 ⁱ	0.70
Fibras dietéticas totales	0.75 ^j	0.68 ^k	0.61 ^k	0.68
Cenizas totales	0.58 ^l	0.72 ^m	0.63 ^l	0.64
Poder germinativo	0.83 ⁿ	0.91 ^o	0.70 ^p	0.81
TOTALES PROMEDIOS	0.73^r	0.69^r	0.66^r	0.69

Letras diferentes en filas indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

De un análisis especificado por municipio, se puede apreciar que en promedios, sólo los granos de cebada cultivados en el municipio de Apan, muestra una moderada calidad y la peor calidad corresponde a los granos cultivados en E. Zapata. Así se puede analizar que en función de los contenidos de humedad en los granos, corresponde el peor resultado a los cultivados en suelos de Almoleya y E. Zapata, lo cual se correlaciona con los suelos de texturas más arenosas y con menores capacidades de retención de agua. De forma similar sucede con la densidad por peso hectolitro de los granos; el más bajo ICCM corresponde a suelos de más baja calidad (E. Zapata). Es importante destacar que la densidad por peso hectolitro está asociada a los contenidos de carbohidratos y el ICCM se corresponde en este mismo orden.

Los contenidos de grasas se consideran en proporciones normales. Por otra parte, los contenidos de proteínas, en promedio representan cerca de 0.7 de ICCM, lo cual permitiría valorarlos como de moderada a alta calidad. Sin embargo debe hacerse notar que el valor del ICCM para proteínas de los granos de cebada cultivados en E. Zapata puede resultar engañoso; si bien el contenido promedio de proteínas en granos de cebada en E. Zapata (tabla VI.29) fue de 12% (valor de máximos contenidos ideales para producción de malta), puede entenderse que está relacionado con la práctica y usos de fertilizantes nitrogenados en estos suelos.

Así también puede analizarse la correlación en contenidos de cenizas totales acumuladas en granos, asociada a suelos con mayores contenidos de sales disponibles discutidos en los apartados de suelos; correspondiendo a suelos de Apan los más altos valores así como los mayores valores de ICCM.

Lograr elevar los contenidos de fibra dietética en granos de cebada cultivados en estos municipios a valores cercanos a 5-6%, puede resultar en elevar la calidad



maltera del producto. Las fibras se describen como polisacáridos no almidonados (polisacáridos no amiláceos). Algunos constituyentes de las fibras son la celulosa, las hemicelulosas, las pectinas, las gomas y los mucílagos. Los términos que a veces se mencionan de fibra cruda, fibra detergente-neutra, fibra dietética se refieren a la fibra en general y reflejan tan sólo diferentes metodologías empleadas para estimar el contenido de fibra en los alimentos, ya que no se pueden identificar con estos métodos los diferentes tipos de fibra. Por ejemplo, la estructura química de la celulosa y las de otras fibras de polisacáridos son similares.

La fibra tiene gran capacidad de absorción y retención de agua, al ser una sustancia osmóticamente activa. Todas las fibras lo hacen en mayor o menor medida. Influyen muchas variables como el tamaño de las partículas, pH (Noakes *et al.*, 1996), y los electrolitos presentes en el medio (Eatswood, 1992). En el caso del tamaño de partícula se ha comprobado que cuanto mayor sea éste, más capacidad de absorción de agua tiene. Al analizar estos elementos se puede inferir que esto posibilitaría la opción de incrementar los ICCM en humedad retenida en granos y el incremento del índice de peso hectolitro.

Con relación al estudio comparativo de técnicas para evaluar el poder germinativo en semillas de cebada maltera se procedió a analizar los resultados considerando más sensato analizar por una parte los test cuya base es una tinción o test colorimétrico (tetrazolio e índigo carmín) y por otra, los que consideran una evaluación de germinación propiamente (peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico) y compararlos con una germinación natural (en agua). En la tabla VI.38 se observan los resultados de los test colorimétricos comparados con la germinación natural.

Se puede apreciar que el método de germinación natural al término de 48 horas ofrece los mejores resultados, corroborando que las semillas de Apan alcanzan un índice en este indicador que permite evaluarlas como alta calidad (96.7% de poder germinativo); por su parte las semillas de Almoloya (86.1%) clasifican dentro de norma y las de Emiliano Zapata (78.1%), no llegan a cumplir con las especificaciones establecidas (NMX-FF-043-SCFI-2003) lo cual demuestra que estas últimas no podrían ser comercializadas para fines malteros a pesar de mostrar una aceptable calidad del poder germinativo.

En cuanto a los resultados de los test colorimétricos se puede inferir que ambos se comportan como buenos predictores, sin embargo el método del índigo carmín, a pesar de no estar reconocido en las normas internacionales (ISTA, 2003; Benito *et al.*, 2004) ofrece ciertas ventajas con relación al método del tetrazolio por cuanto ofrece resultados más elevados de la facultad germinativa y con menores desviaciones estándar lo que indica cierto grado de mayor precisión además de ser mucho más económico por el costo del reactivo y su estabilidad y durabilidad en solución acuosa.



Tabla VI.38. Germinación, test de índigo-carmín y test de tetrazolio por municipio y su comparación con la germinación natural.

Muestra de:	Método	Réplicas (%)				Media (%)	Desv. Est	%CV
		1	2	3	4			
Control (+)	Germinación Natural	98	100	99	98	98.8	0.83	0.84
	Tetrazolio	85	88	72	87	83.0	6.44	7.76
	Índigo carmín	92	94	93	89	92.0	1.87	2.03
Apan	Germinación Natural	97	96	96	97	96.7	0.59	0.61
	Tetrazolio	81	86	87	86	85.1	2.38	2.80
	Índigo carmín	91	92	87	92	90.4	2.08	2.30
Almoleya	Germinación Natural	84	94	86	80	86.1	5.01	5.82
	Tetrazolio	81	80	81	71	78.1	4.08	5.23
	Índigo carmín	82	76	83	80	80.2	2.62	3.27
E. Zapata	Germinación Natural	84	74	77	77	78.1	3.61	4.63
	Tetrazolio	65	40	63	60	57.0	9.97	17.50
	Índigo carmín	77	71	70	72	72.5	2.69	3.71
Control (-)	Germinación Natural	35	24	28	24	27.8	4.49	16.19
	Tetrazolio	4	7	3	9	5.8	2.38	41.48
	Índigo carmín	26	36	29	30	30.3	3.63	12.00

Esto también puede corroborarse en la tabla VI.39 donde se muestran los valores de correlación (r^2), notándose que en los del test del índigo carmín resultan superiores al del tetrazolio y al de germinación natural. Esto se corresponde con lo reportado por Moreno y colaboradores (2001).

También Bhering y colaboradores (2005), trabajando con semillas de melón de agua encontraron valores de r^2 similares a los encontrados en el presente trabajo y evaluando igualmente la germinación natural y comparando con el test del tetrazolio.

Estos resultados permiten proponer el test del índigo carmín como predictor de la facultad germinativa en semillas de cebada maltera, lo cual no está reportado en la bibliografía consultada.

Tabla VI.39. Regresiones lineales en los test colorimétricos. Análisis del porcentaje de embriones vivos por procedencias (p = nivel de significación).

Índice	Apan			Almoleya			Emiliano Zapata		
	Germin. Natural	Índigo	Tetraz	Germin. Natural	Índigo	Tetraz	Germin. Natural	Índigo	Tetraz
r^2	0.891	0.753	0.736	0.931	0.920	0.679	0.833	0.835	0.764
P	0.014	0.032	0.038	0.008	0.005	0.072	0.016	0.016	0.032

Índice	Control (+)			Control (-)		
	Germin. Natural	Índigo	Tetraz	Germin. Natural	Índigo	Tetraz
r^2	0.897	0.914	0.753	0.848	0.911	0.894
p	0.011	0.006	0.033	0.015	0.004	0.062

La diferencia entre ambos análisis colorimétricos puede estar referenciada por las partes de la semilla que tiñen cada uno. La mejor respuesta que se obtiene del índigo carmín puede deberse a la facilidad relativa para considerar los daños. En estos test puede influir la subjetividad en la interpretación de los resultados, basada principalmente en la experiencia del evaluador, donde se puede suponer que es más difícil interpretar zonas de las semillas pobremente teñidas por el tetrazolio que las más intensamente teñidas por el índigo carmín. También puede



estar presentar cierta falta de tonalidad y errores en la manipulación, siendo complicado interpretar la importancia de zonas que pueden ser básicas para el desarrollo del embrión y posterior germinación de las semillas. Esto ha sido discutido igualmente por Benito y colaboradores (2004).

La tinción de las zonas muertas define claramente cómo se encuentra la semilla, y a pesar de que también pueden aparecer indefiniciones en el proceso de tinción, éstos ofrecen menos dudas en la interpretación ya que se considera que las zonas teñidas están claramente muertas.

En la figura VI.27 se hacen notar los embriones viables (vivos) teñidos por tetrazolio y a diferencia de la coloración observable en el test del índigo carmín donde se tiñen las partes muertas. En la figura 1 a) se aprecian los resultados en el control positivo para ambos ensayos y en la b) los del control negativo.

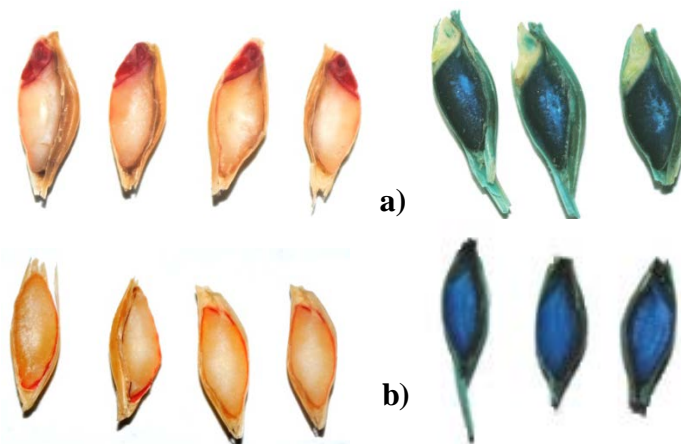


Figura VI.27. Fotografías de las semillas sometidas a los test colorimétricos. a) Control positivo; b) Control negativo.

Los resultados de los test germinativos se muestran en las tablas 3 y 4. La tabla VI.40 muestra los resultados de germinación según los tests del peróxido de hidrógeno y del ácido sulfúrico por municipio de procedencia y su comparación con la germinación natural.

Se observa que el método de germinación natural al término de 48 horas ofrece los mejores resultados, las semillas de Apan alcanzan un índice de alta calidad (94.4% de poder germinativo); las semillas de Almoloya (85.6%) clasifican dentro de norma y las de Emiliano Zapata (64.5%), no llegan a cumplir con las especificaciones establecidas (NMX-FF-043-SCFI-2003) por lo cual se corroboró lo anteriormente señalado que estas últimas no podrían ser comercializadas para fines malteros.

Se puede resaltar que en efecto el control negativo resultó una semilla no viable en todas las pruebas mostrando como poder germinativo valores entre 5-30%, independiente de ser evaluados por métodos colorimétricos o germinativos.

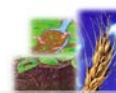


Tabla VI.40. Germinación, test del peróxido de hidrógeno y test del ácido sulfúrico por municipio y su comparación con la germinación natural.

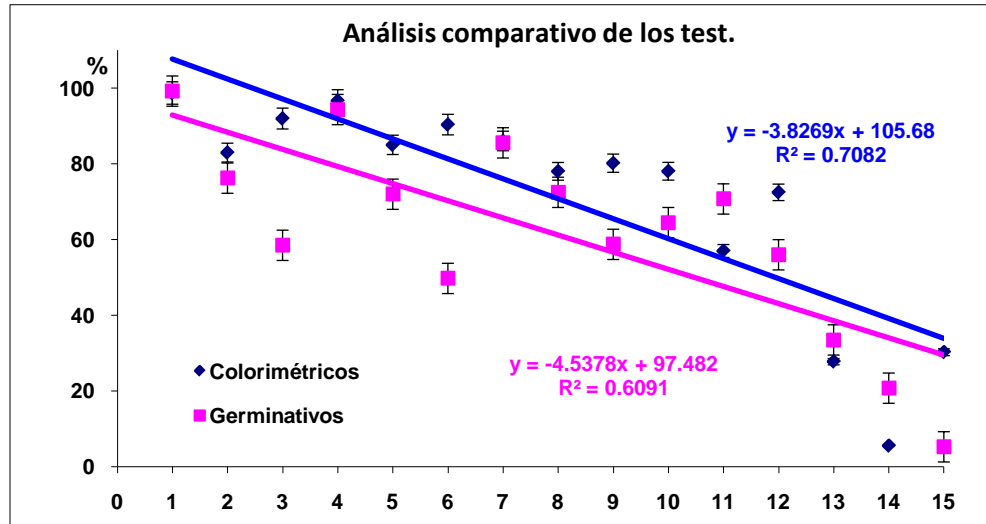
Muestra de:	Método	Réplicas (%)				Media (%)	Desv. Est	%CV
		1	2	3	4			
Control (+)	Germinación Natural	100	98	99	100	99.3	0.83	0.84
	Peróx. de hidrógeno	80	74	82	69	76.3	5.12	6.71
	Ácido sulfúrico	64	60	50	60	58.5	5.17	8.84
Apan	Germinación Natural	94	90	96	97	94.4	2.78	2.95
	Peróx. de hidrógeno	75	78	75	60	72.0	7.04	9.77
	Ácido sulfúrico	58	50	51	40	49.8	6.42	12.90
Almoloya	Germinación Natural	80	88	94	80	85.6	5.83	6.81
	Peróx. de hidrógeno	68	70	82	70	72.5	5.55	7.65
	Ácido sulfúrico	65	48	60	62	58.8	6.46	10.99
E. Zapata	Germinación Natural	79	57	62	60	64.5	8.56	13.27
	Peróx. de hidrógeno	76	69	68	70	70.8	3.11	4.40
	Ácido sulfúrico	62	45	57	60	56.0	6.60	11.78
Control (-)	Germinación Natural	30	40	36	28	33.5	4.77	14.24
	Peróx. de hidrógeno	28	10	25	20	20.8	6.83	32.93
	Ácido sulfúrico	4	3	7	7	5.3	1.79	34.01

Los métodos germinativos también se comportan como buenos predictores de la facultad germinativa de las semillas de cebada lo cual se corrobora en la tabla VI.41 donde se aprecian los niveles de regresiones (r^2), todos superiores a 0.70. No obstante se puede inferir que en este estudio se han encontrado mejores resultados con los métodos colorimétricos. Esto se puede analizar a partir de la figura VI.28. Los métodos colorimétricos asociados al de germinación natural, ofrecen una mejor regresión ($r^2 = 0.7082$) que los otros métodos germinativos ($r^2 = 0.6091$) y menores dispersiones.

Tabla VI.41. Regresiones lineales en los test de germinación. Análisis del porcentaje de embriones vivos por procedencias. ($p =$ nivel de significación)

Índice	Apan			Almoloya			Emiliano Zapata		
	Germin. Natural	Peróx	A. Sulf	Germin. Natural	Peróx	A. Sulf	Germi. Natural	Peróx	A. Sulf
r^2	0.920	0.736	0.867	0.833	0.717	0.842	0.781	0.806	0.838
p	0.005	0.038	0.024	0.016	0.052	0.016	0.044	0.025	0.015

Índice	Control (+)			Control (-)		
	Germin. Natural	Peróx	A. Sulf	Germin. Natural	Peróx	A. Sulf
r^2	0.891	0.802	0.824	0.793	0.763	0.804
p	0.014	0.025	0.020	0.040	0.048	0.040



Leyenda del eje X: 1, 2, 3: Control (+); 4, 5, 6: Apan; 7, 8, 9: Almoloya; 10, 11, 12: E. Zapata; 13, 14, 15: Control (-)

Figura VI.28. Análisis comparativos entre los test colorimétricos y germinativos para evaluar la facultad germinativa en semillas de cebada maltera.

VI.9. Análisis de correlaciones estadísticas.

VI.9.1. Correlaciones en suelos

La figura VI.29 muestra las correlaciones entre los parámetros de densidades reales y aparentes con las texturas franco arcillo arenosas y franco arenosas de los suelos de los tres municipios. A su vez se correlacionan estas propiedades con los contenidos de materia orgánica. Los tres suelos resultan semejantes en densidades reales y aparentes, con valores relativamente bajos ocasionados por el uso de un sistema de monocultivo que data de más de 40 años.

Se marca la diferencia en los contenidos de arena, prevaleciendo en este sentido los suelos de Emiliano Zapata y correspondiendo con los suelos de menores contenidos de materia orgánica. Se puede observar una correspondencia de los mayores contenidos de materia orgánica (MO) con los suelos del municipio de Apan con mayores contenidos de arcillas. En general los contenidos de MO resultan (entre 6.0-8.0%) con muy bajos contenidos de la misma de formas disponibles (entre 1.0-2.5%).

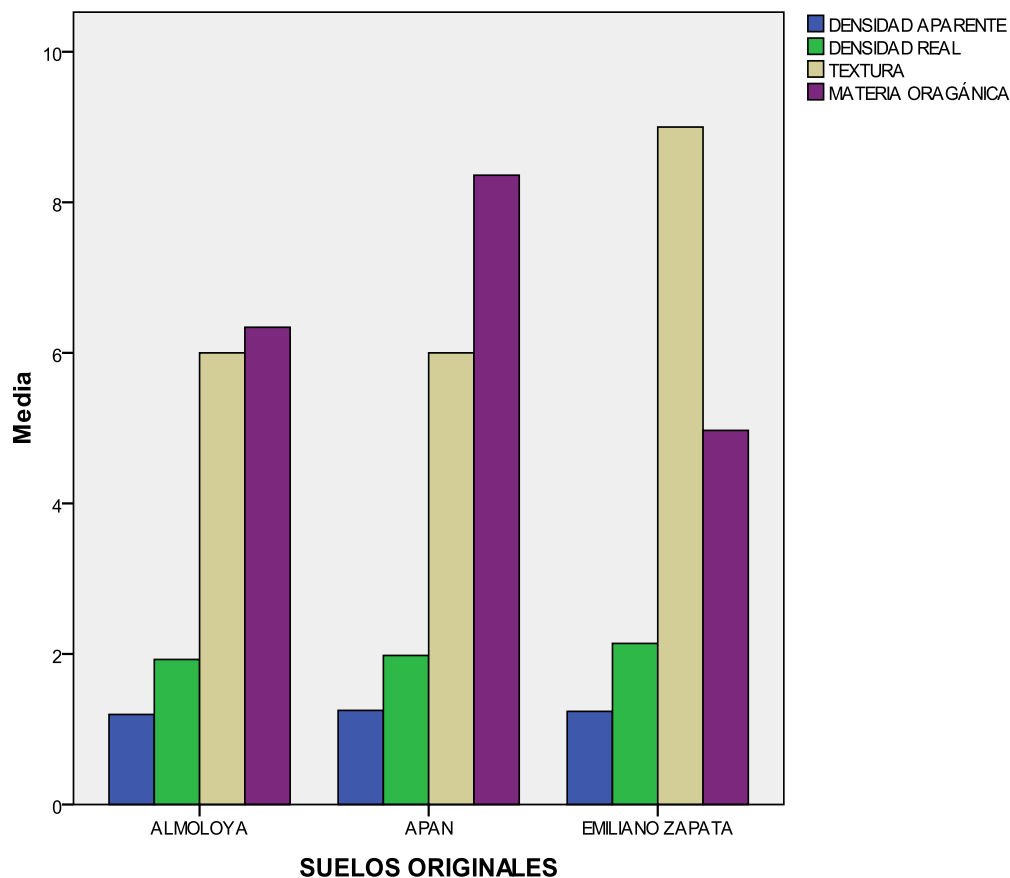


Figura VI.29. Correlación de densidades de suelos con las texturas y la materia orgánica

En la figura VI.30 se muestra la correspondencia de propiedades electroquímicas como son el pH, el pZ y la conductividad eléctrica (CE) en los extractos de saturación de los suelos en estudio. Igualmente los contenidos de sales cuantificables (SC) y disueltas en dichos extractos de saturación. Se puede observar la perfecta correspondencia de la CE y los contenidos de SC, siendo los suelos con proceso de salinización los de Emiliano Zapata, lo que se corresponde con prácticas frecuentes de encalado y el uso de fertilizantes con mayor frecuencia.

De igual manera se observa la correspondencia de las propiedades antes mencionadas y los valores de pZ y en orden contraria, los valores de potenciales redox (Eh).

En general se observa que los suelos de Emiliano Zapata son los de más alta salinidad, los menos reductores y aunque presentan una mayor estabilidad de los coloides en los extractos de saturación, esto se corresponde no contenidos de materia orgánica, sino a las sales disueltas en los mismos.

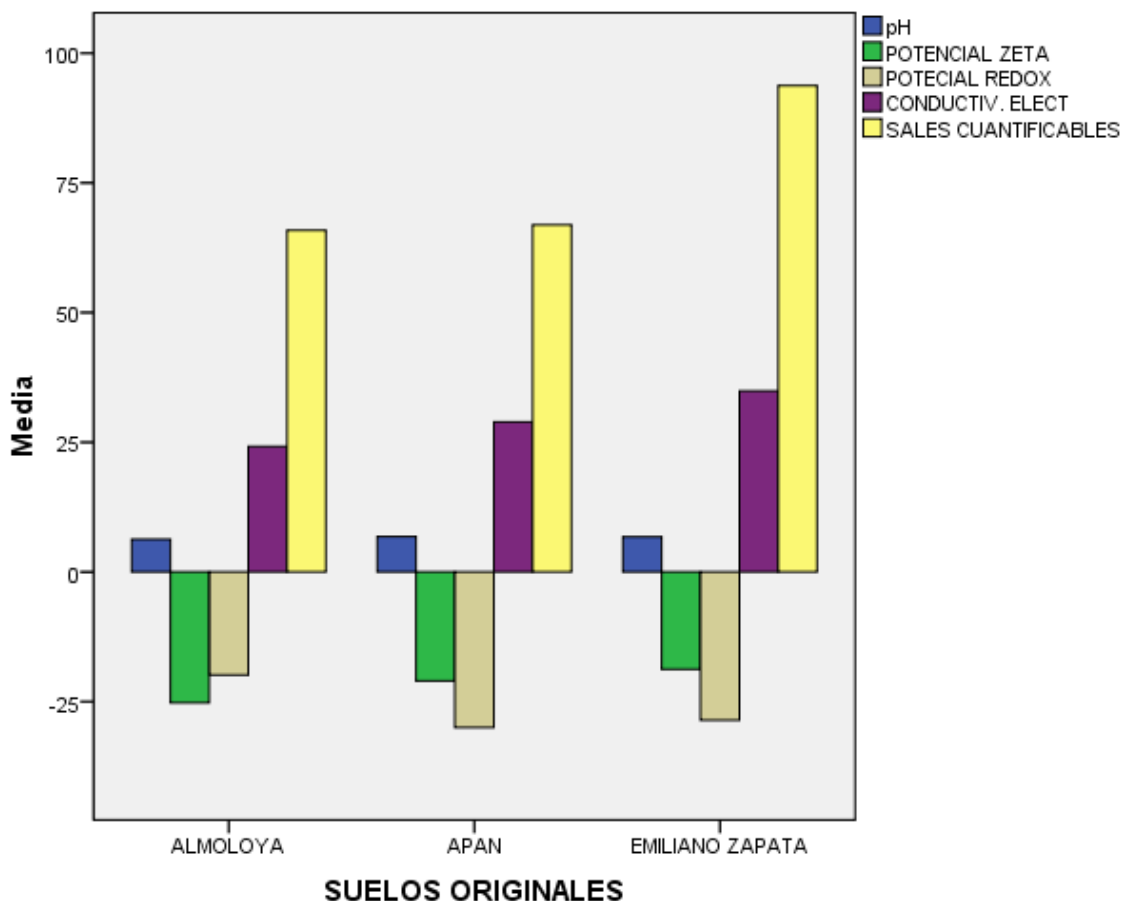
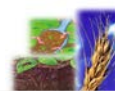


Figura VI.30. Correlaciones entre propiedades electroquímicas en los extractos de saturación de suelos.

En la figura VI.31 se muestra la correlación que se ha encontrado entre las sales presentes en estos suelos, en forma de carbonatos y bicarbonatos y las cuantificables. Se puede entender la similitud y correlación que se tiene entre suelos de Almoloya y Apan. Estos últimos presentan un mayor contenido en bicarbonatos, lo que se corresponde con suelos con mayores capacidades de retención de humedad.

Sin embargo se puede apreciar que los contenidos en carbonatos y bicarbonatos en los suelos de Emiliano Zapata resultaron muy bajos a pesar de que las sales solubilizadas y cuantificables son las más elevadas concentraciones. Esto permite corroborar los sistemas de aplicaciones de encalado (oxihidróxidos de calcio).

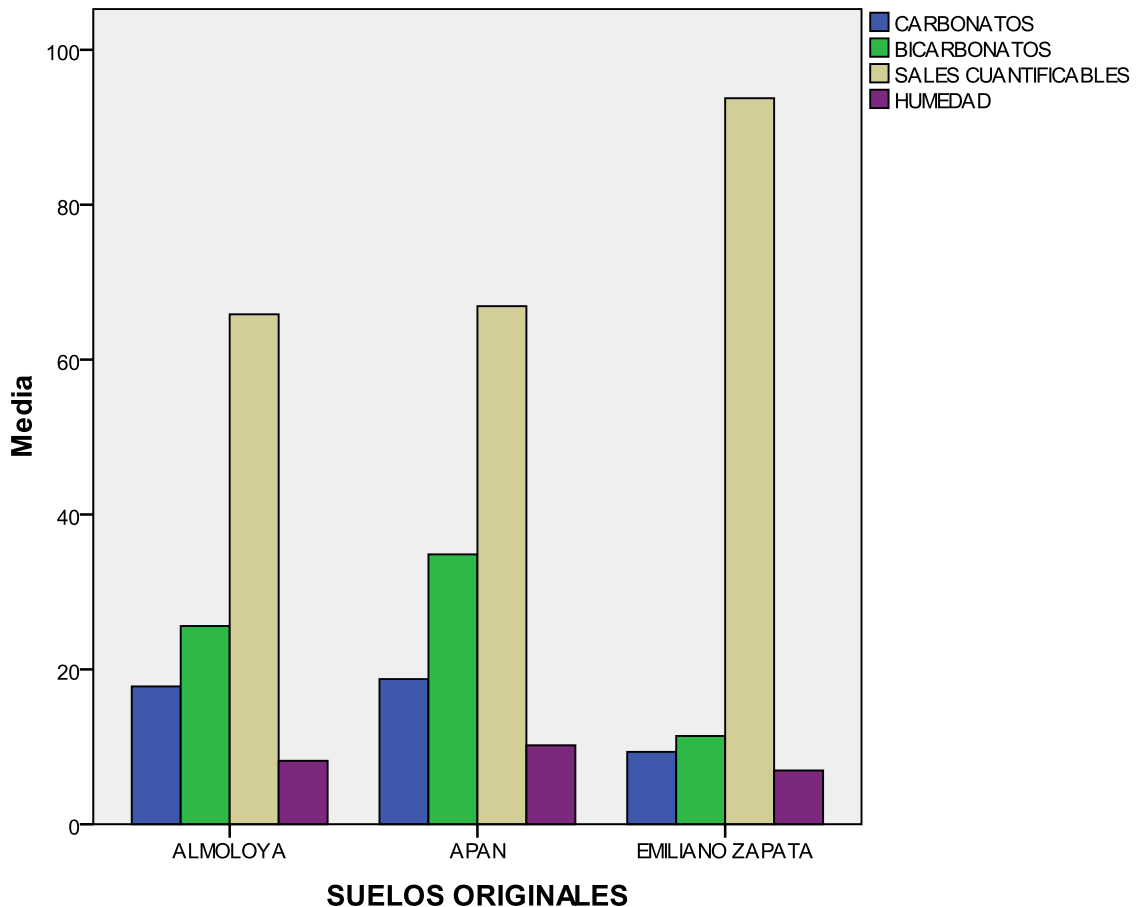


Figura VI.31. Correlaciones entre las formas de sales evaluadas en los extractos de saturación de suelos.

En la figura VI.32 se muestra la correspondencia que se encontró entre texturas y la capacidad de retención de humedad por cada suelo y al mismo tiempo con la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Se puede apreciar que no existen marcadas diferencias entre texturas de suelos de Apan y Almoloya; sin embargo al entender que los suelos de Apan mostraron mayores contenidos de arcillas, se puede comprender sus mayores capacidades de retención de humedad y con ello mayores CIC.

Contrariamente mayores contenidos de arena en los suelos de Emiliano Zapata, permite comprender las más baja capacidad de retención de humedad y la menor CIC.

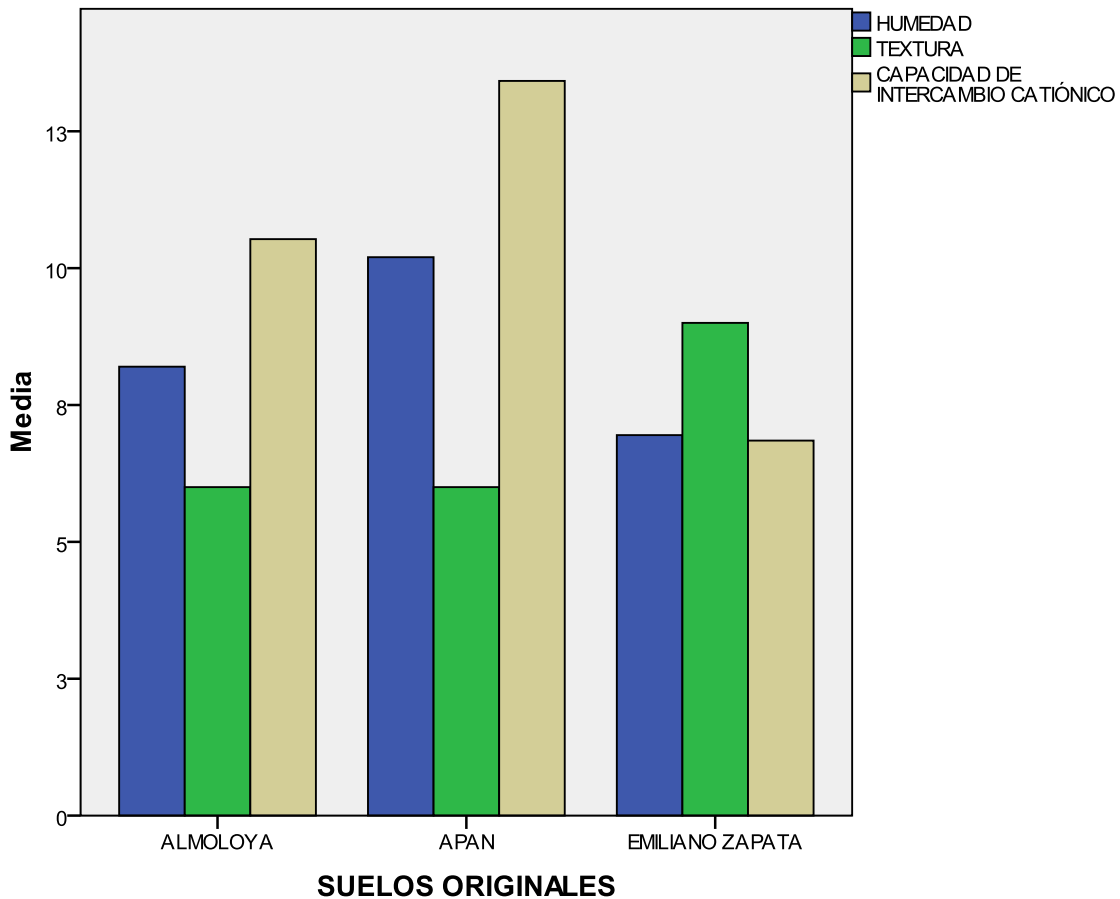


Figura VI.32. Correlaciones entre humedades, texturas y capacidades de intercambio catiónico.

Al analizar los contenidos de sodio, potasio, calcio y magnesio que se encontraron en los suelos por mineralización e hidrólisis de las muestras (figura VI.33) y la correspondencia con los contenidos de cenizas (como óxidos de los metales), se observa que por los niveles de sodio, no hay diferencias significativas. Tampoco por los contenidos de potasio (aunque bajos) ni de magnesio se observan diferencias significativas.

Son los contenidos de calcio los que se correlacionan con los contenidos de cenizas. Esto puede corresponderse con las prácticas de encalado, siendo en Emiliano Zapata, la marcada diferencia. Es también en este municipio donde se presentan los más bajos niveles de potasio y las peores relaciones Na^+/K^+ y $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$.

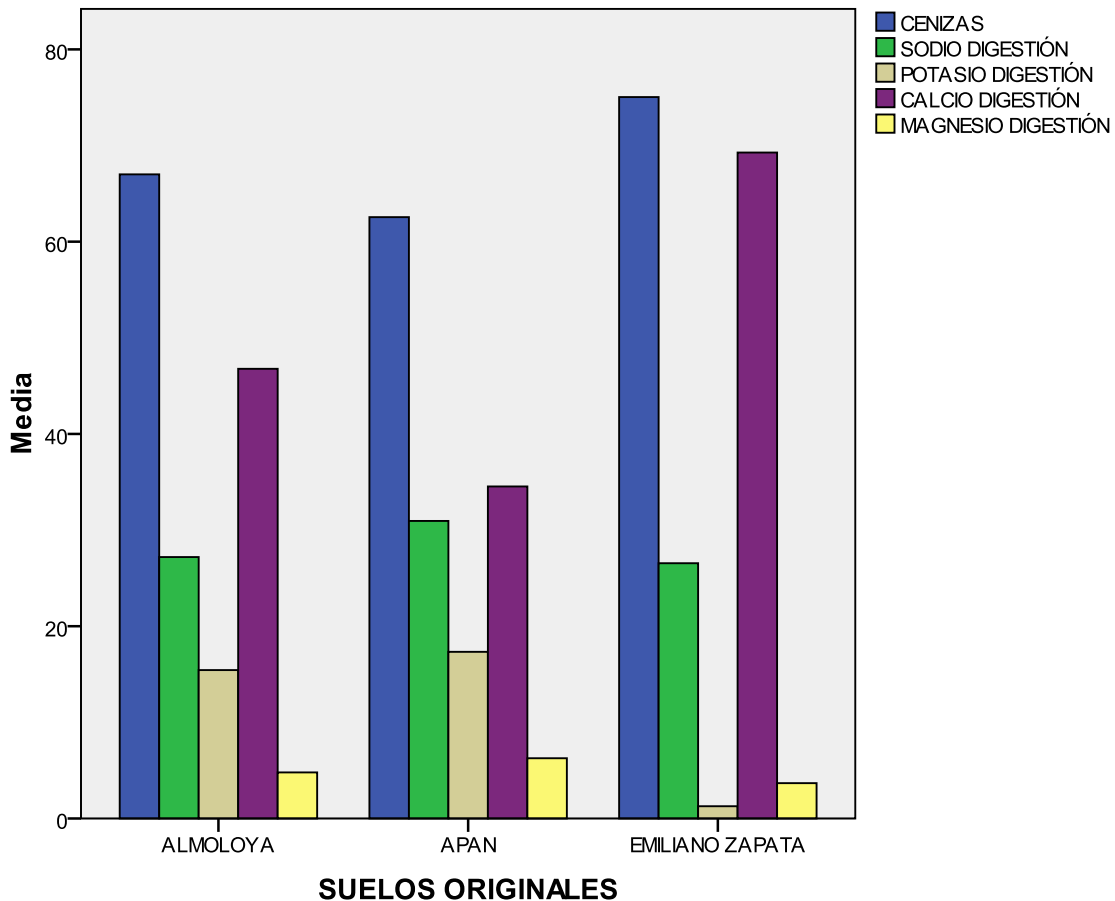


Figura VI.33. Correlaciones entre contenidos de metales sodio, potasio, calcio y magnesio y los contenidos de cenizas.

En la figura VI.34 se observa la relación que se encontró entre contenidos de metales tóxicos como plomo y níquel y la CIC. Los contenidos de plomo y níquel que fueron extraídos de los suelos resultaron bajos y en este sentido, fueron mayores los contenidos de plomo. Estos contenidos se asocian a las cercanías a las carreteras y vías de comunicación y las emisiones de plomo por combustión de gasolinas de vehículos automotores, a lo largo de 40 años de usos sistemáticos.

Fue en suelos del municipio de Emiliano Zapata donde se encontraron los mayores contenidos tanto de plomo como de níquel a pesar de tratarse de los suelos con menores CIC. Esto permite corroborar que en esta región se han aplicado sales y fertilizantes a estos suelos y que estos elementos se acumulan por estar presentes en dichos productos.

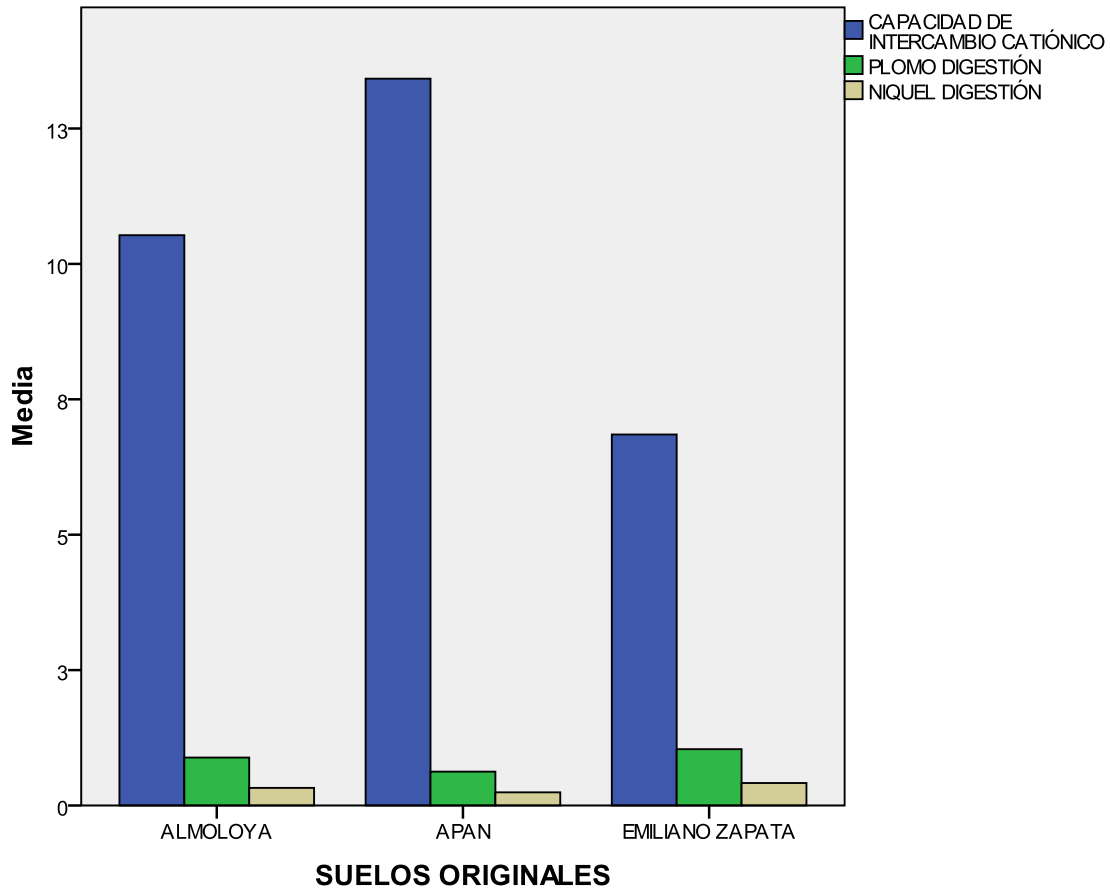


Figura VI.34. Correlaciones entre contenidos de metales tóxicos plomo y níquel y las capacidades de intercambio catiónico.

En la figura VI.35 muestra correlaciones entre los metales en suelos que fueron evaluados por fluorescencia de rayos X (FRX). Se puede comprobar que los niveles de magnesio y potasio resultaron en extremo bajos (prácticamente a niveles de trazas) a pesar de ser nutrientes esenciales para el cultivo. Por su parte los niveles de calcio y sodio se pueden considerar excedidos aunque no en magnitud que resulte perjudicial para el cultivo de cebada. Por su parte si se considera deficitario en todos los suelos los niveles de potasio.

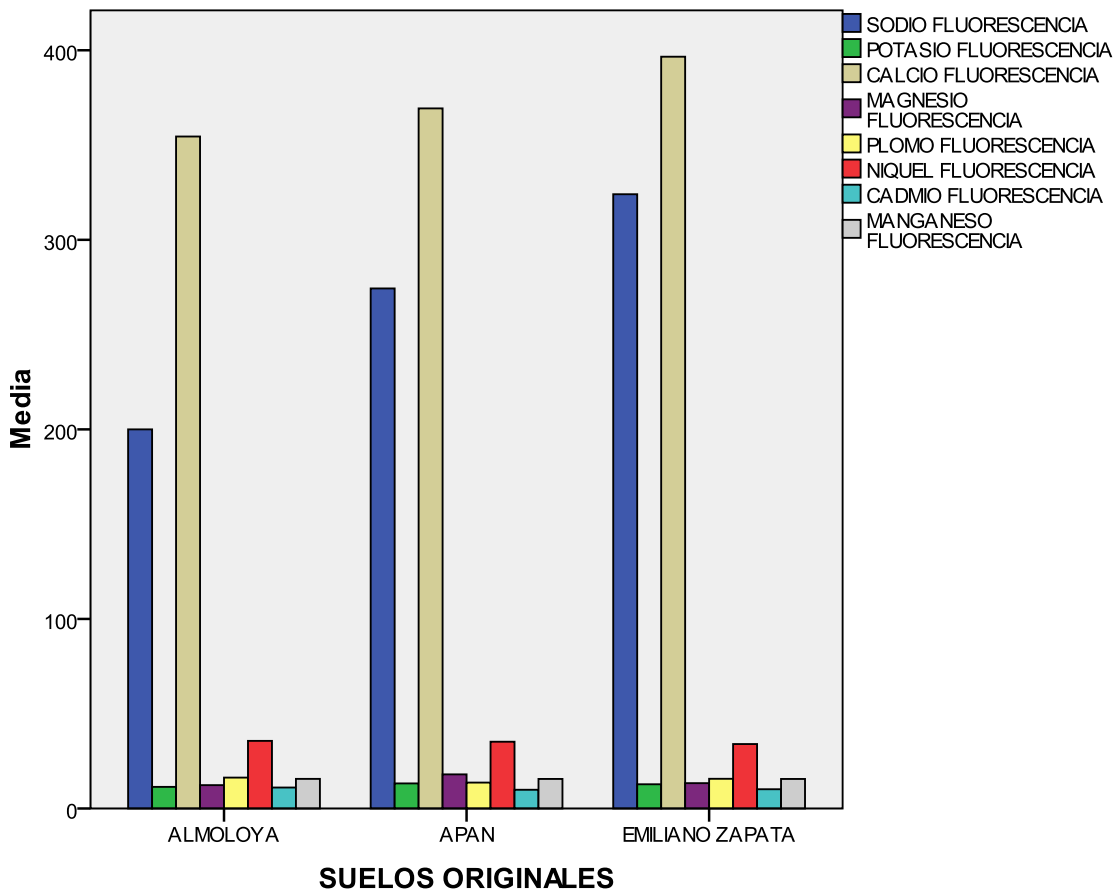


Figura VI.35. Correlaciones entre contenidos de metales evaluados por fluorescencia de rayos X.

VI.9.2. Correlaciones en cultivo de cebada

La figura VI.36 muestra la correlación de % de humedades en órganos del cultivo por cada municipio. Se observa que en el momento de la cosecha son los granos los que mayor porcentaje de humedad acumulan. Es el cultivo del municipio de Apan el que mayores porcentajes presenta por lo cual se corresponden a los mayores rendimientos por hectáreas. Al analizar este valor promedio con el propuesto como índice de calidad se observa que al no alcanzar el valor mínimo de la normatividad NMX-FF-043-SCFI-2003 (quedar por debajo de 11.5 %), los cultivos de Almoloya y E. Zapata deben recibir una bonificación por baja humedad, pero esto hace que los rendimientos sean menores.

Los contenidos de cenizas en % están asociados a los contenidos de óxidos de metales que han sido adsorbidos a través del sistema radicular y traslocados a diferente órganos de la planta. En la figura VI.37 se puede notar que en efecto es en la raíz donde se encuentra el mayor porcentaje bioacumulado de cenizas.

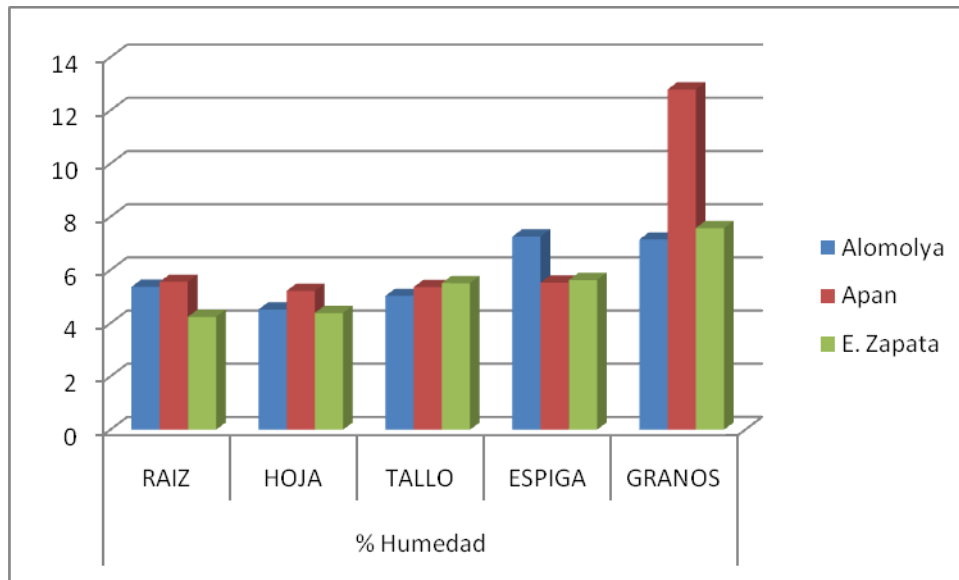


Figura VI.36. Correlaciones en contenidos de humedad por órganos del cultivo y por cada municipio.

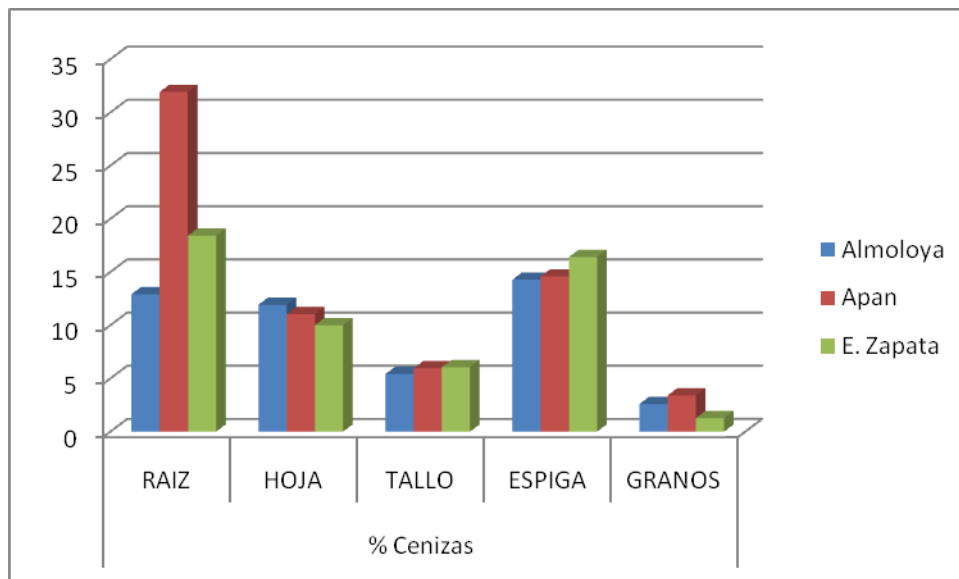


Figura VI.37. Correlaciones en contenidos de % de cenizas por órganos del cultivo y por cada municipio.

Es en las raíces del cultivo de Apan donde se produce la mayor bioacumulación, seguido del municipio de E. Zapata. Le sigue en orden de importancia los contenidos bioacumulados en espigas.

Los contenidos de proteínas fundamentalmente están bioacumulados en el grano. Es importante destacar que los más elevados contenidos encontrados en los granos del municipio de E. Zapata, están asociados a las reiteradas aplicaciones



de fertilizantes nitrogenados, toda vez que resultan los suelos menos fértiles. (figura VI.38.). Esto permite explicar cómo en el ICCM para el indicador de calidad proteína, se obtuvo 1.00, valor no esperado y que resulta como ideal para un suelo menos fértil.

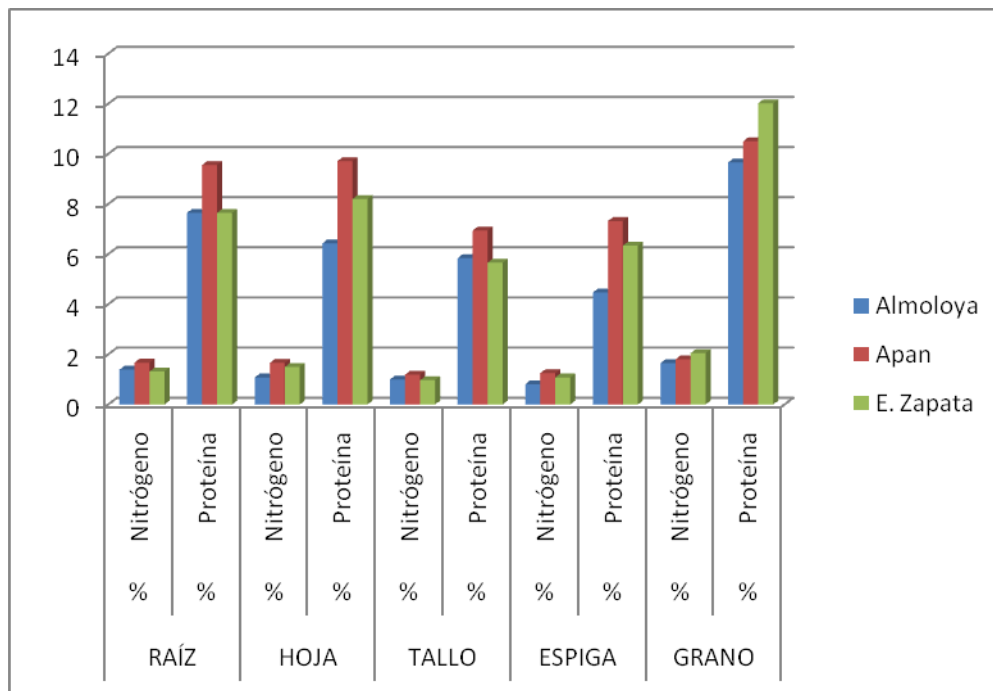


Figura VI.38. Correlaciones en contenidos de % de proteínas por órganos del cultivo y por cada municipio.

Los contenidos de grasas, específicamente en granos de estos cultivos, resultaron normales y en el rango establecido por la NMX-FF-043-SCFI-2003 para los cultivos en los tres municipios. Sin embargo los contenidos prácticamente ideales se detectaron en los granos del municipio Almoloya (figura VI.39.). Con ello se puede explicar el valor de 0.74 de ICCM para este indicador de calidad de los granos de cebada.

Por otra parte los contenidos de fibras se concentran mayoritariamente en el tallo de este cultivo (figura VI.40) en tanto que los carbohidratos se distribuyen entre todos los órganos en más del 50 % pero de forma más resaltante en los granos y en forma de almidones y azúcares (figura VI.41).

Lo relacionado con los contenidos de metales encontrados como bioacumulados por órganos del cultivo, se pueden analizar las figuras VI.42, VI.43 y VI.44 donde se muestran las correlaciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} ; Na^+ y K^+ y Pb^{2+} y Ni^{2+} , respectivamente. En la figura VI.42 se observa la máxima bioacumulación de calcio y magnesio en las hojas del cultivo lo cual se asocia a los mecanismos de fotosíntesis. Así mismo sucede con el potasio (figura VI.43). El Ca^{2+} resultó también el elemento mayoritario en suelos, seguido del Na^+ .

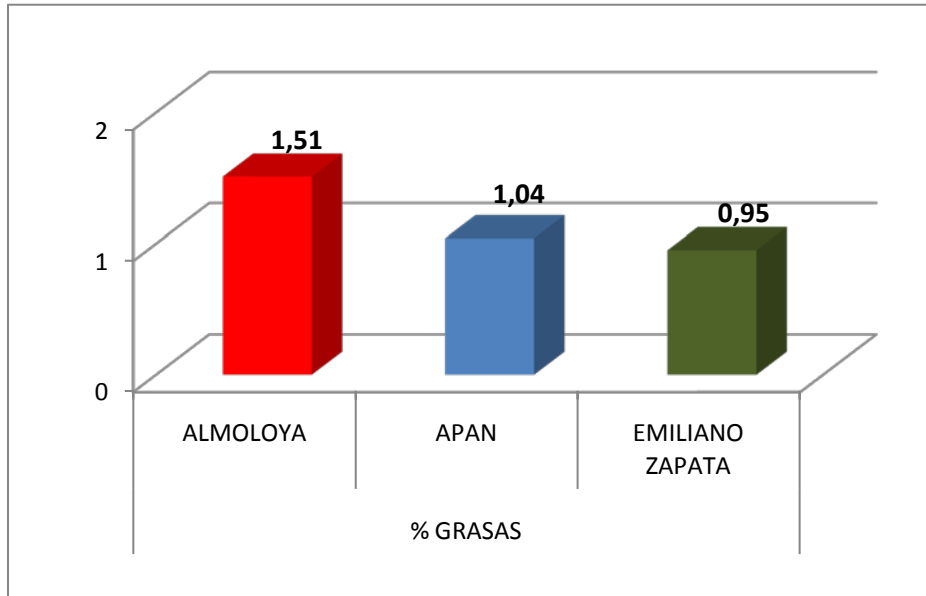


Figura VI.39. Correlaciones en contenidos de % de grasas por órganos del cultivo y por cada municipio.

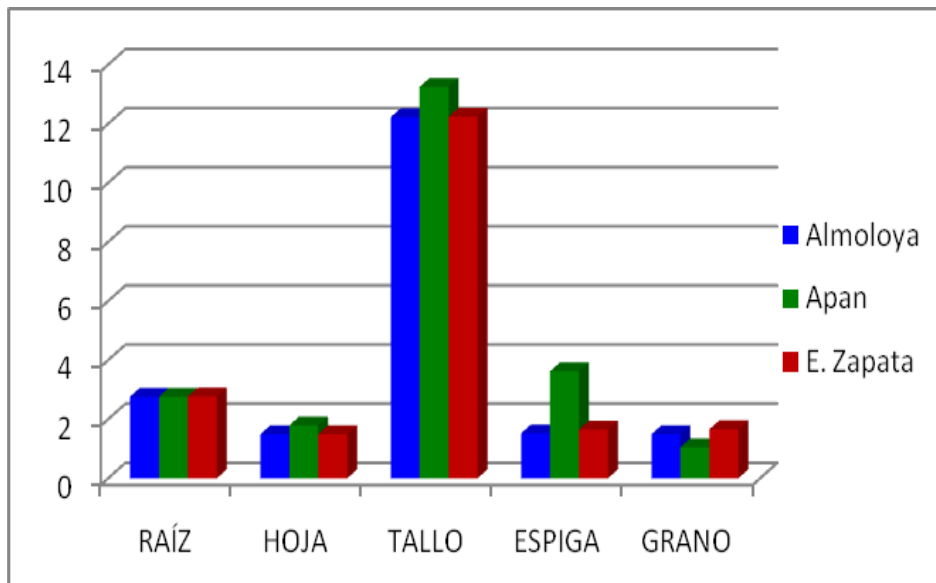


Figura VI.40. Correlaciones en contenidos de % de fibras por órganos del cultivo y por cada municipio.

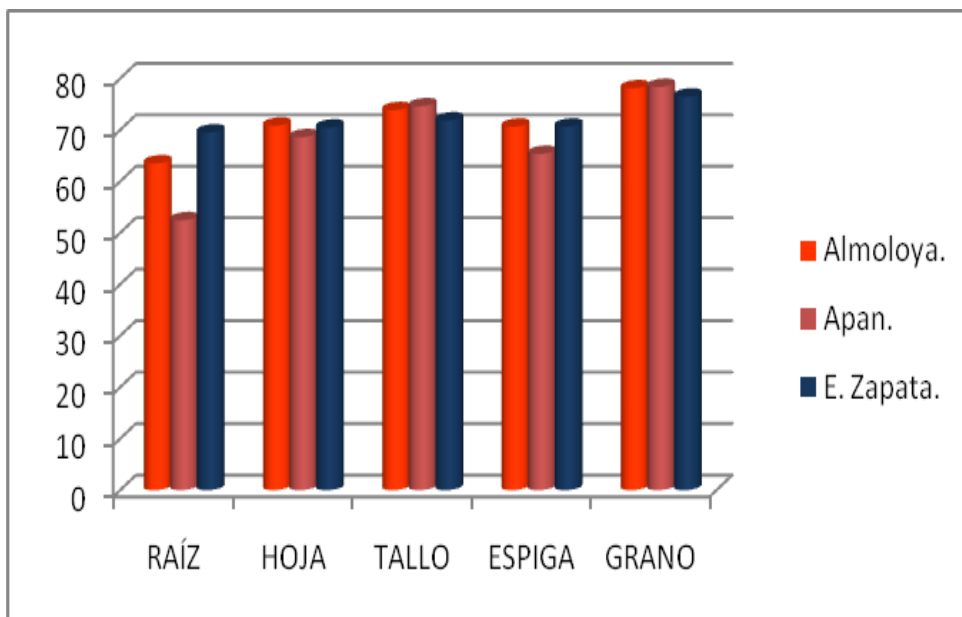
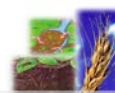


Figura VI.41. Correlaciones en contenidos de % de carbohidratos por órganos del cultivo y por cada municipio.

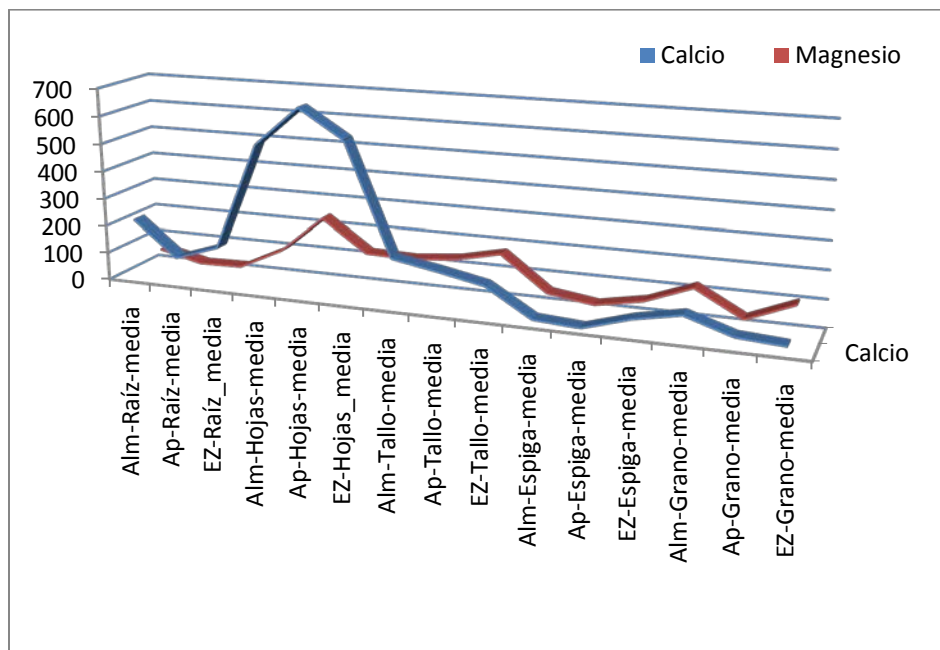


Figura VI.42. Correlaciones en contenidos de metales Ca^{2+} y Mg^{2+} por órganos del cultivo y por cada municipio.

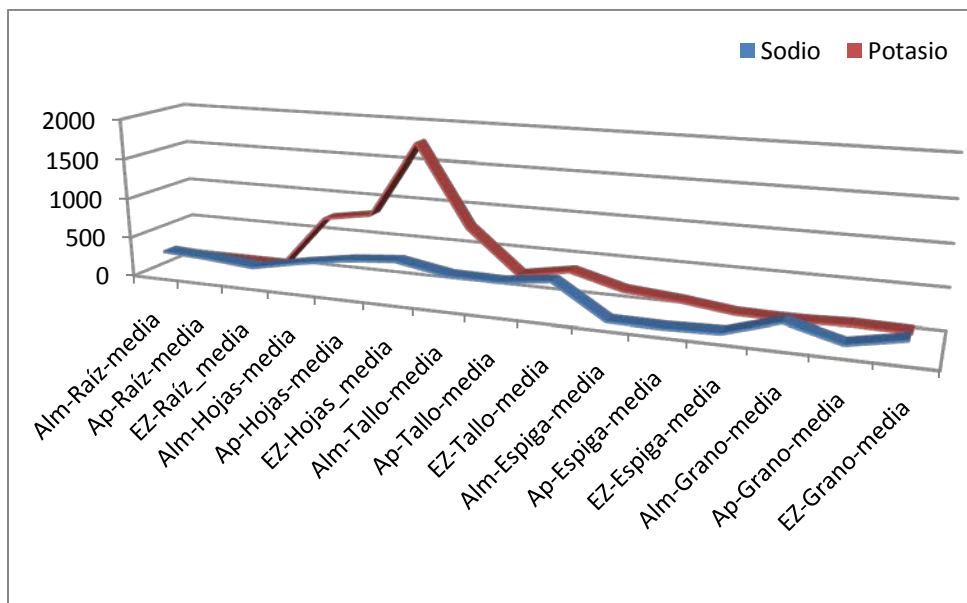
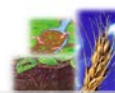


Figura VI.43. Correlaciones en contenidos de metales Na^+ y K^+ por órganos del cultivo y por cada municipio.

En la figura VI.44 se observa la correlación de Pb^{2+} y Ni^{2+} . En el caso particular del níquel se observa una bioacumulación favorecida en tallos y espigas del cultivo, no así en granos. Por parte del plomo se aprecia una bioacumulación en espigas y granos, mayormente en estos últimos.

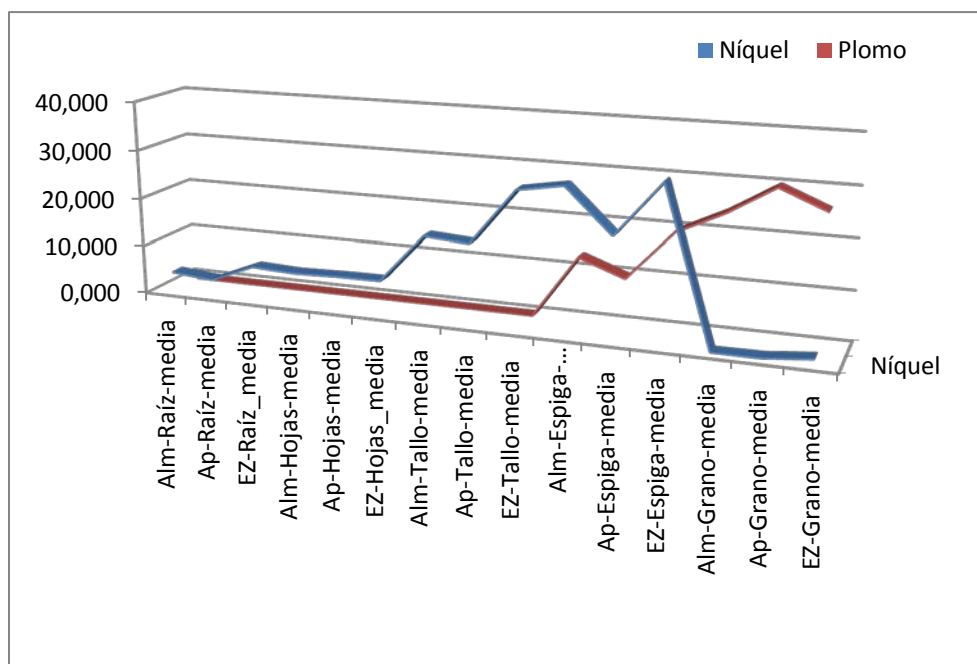


Figura VI.44. Correlaciones en contenidos de metales Pb^{2+} y Ni^{2+} por órganos del cultivo y por cada municipio.



VI.10. Bibliografía.

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentaste, E., Sarzanini, C. y Barberis, R. (2002). Distribution and Mobility of Metals in Contaminated Sites. Chemometric Investigation of Pollutant Profiles. *Environmental Pollution*, 119, p. 177.
- Álvarez, R and H Steinbach. (2006). Valor agronómico de la materia orgánica. Pp. 13-29 En: *Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Ed. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Álvarez, P. A.; Luna, M.; Hernández, J.; Lara, A.; Salas, M. A.; Cabañas, B. (2006). Production systems of malting barley (*Hordeum vulgare* L.) in Zacatecas state, Mexico. *Agric. Téc. Méx.* 32(2): 181-190.
- Benito, L. F.; Herrero, N.; Jiménez, I.; Peñuelas, J. R. (2004). Aplicación de métodos colorimétricos para la determinación de la viabilidad en semillas de *Pinus pinea*: test Del tetrazolio y el índigo carmín. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 17:23-28.
- Bhering, M. C.; Fernandes do Santo, D.; Barros, D. I. (2005). Adequação da metodologia do teste de tetrazolio para avaliação da qualidade fisiológica de sementes de melancia. *Revista Brasileira de sementes*, 27 (1):176-182.
- Bonadeo, E; I Moreno; A Odorizzi; E Hampp; A Sorondo & M. Bongiovanni. (2002). Relación entre propiedades físico-químicas del suelo y raíces de alfalfa (*medicago sativa* L.). XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
- Bonadeo, E; I Moreno; E. Hampp & A Sorondo. (2001). Factores del suelo que regulan la productividad del cultivo de alfalfa en áreas con Manchoneo. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo: IV-20. Cuba.
- Boulding JR. (1995). Description and sampling of contaminated soils. A field guide, 2nd ed. Boca Raton, FL7 Lewis Publishers; Chapter 3.
- Breuer, L.; Huisman, J. A.; Keller, T.; Frede, H. G. (2006). Impact of a conversion from cropland to grassland on C and N storage and related soil properties: Analysis of a 60 year chronosequence. *Geoderma*, 133:6-18.
- Bronick C. J., and R. Lal. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3–22.
- Cantú, M. P.; Becker, A. R.; Bedano, J. C.; Schiviano, H. F., Parra, B. J. (2009). Evaluation of the impact of land use and management change by means of soil quality indicators, Cordoba, Argentina. *Cadernos Lab. Xeoloxico de Laxe. Coruna*. Vol. 34, pp. 203 – 214.
- Cantú, M. P.; Becker, A.; Bedano, A. C.; Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la Calidad de Suelos Mediante el Uso de Indicadores e Índices en la Pampa Arentina. *Ci. Suelo (Argentina)* 25(2): 173-178.
- Castellano, J. Z.; Uvalle, J. X.; Aguilar, A. (2000). Manual de interpretación de suelos y aguas. 2da Edición. Colección INCAPA. México. p. 109.



- De la Rosa, D. A.; Teutli, M. M.; Ramírez M. E. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. *Rev. Int. Contam. Ambient* 23(3): 129-138.
- Dendy D. A. y Dobraszczyk, B. J. (2004). Cereales y productos derivados. *Química y tecnología*. Editorial Acribia, S. A. pp. 87-107; 127-130; 341-358; 380-382; 389-394.
- Doran, J. W.; Safley, M. (1997). Defining and assessing soil health and sustainable productivity. Pp. 1-28. In: C Pankhurst; BM Doube & VVSR Gupta (eds.). *Biological indicators of soil health*. CAB International, Wallingford.
- Eastwood, M. A. (1992). The physiological effect of dietary fiber: An update. *Annual Review of Nutrition* 12: 19-35.
- Fancelli, AL. (2006). Micronutrientes en la fisiología de las plantas. Pp 11-27. En: M Vázquez (ed). *Micronutrientes en la agricultura*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Buenos Aires, Argentina. 207pp.
- FAO. (1999). Base referencial mundial del recurso Suelo, En: *Informes sobre recursos mundiales de suelos*. Editado por FAO, Roma, Vol. 84; p.36-38.
- Ferreras, L; Magra, G; Besson, P.; Ovalevski, E.; García, F. (2007). Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Ci. Suel.* 25(2): 159-172.
- Flores, J. (2008). Globalización de cadenas agroalimentarias, el caso de la cebada-malta-cerveza en México y su impacto en las condiciones de vida de los productores de cebada del Altiplano Central (1985-2005). Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Departamento de Economía Aplicada I (Economía Internacional y Desarrollo). Universidad Complutense de Madrid, España, p. 197-198.
- Galantini, J.A. and R.A. Rosell, (2006). Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Tillage Research* 87: 72-79
- Galantini, J.A. y L. Suñer. (2008). Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia*, Vol XXV (1) 41-45.
- García, I., Dorronsoro, C. (2005). Contaminación por Metales Pesados. En *Tecnología de Suelos*. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola.
- García, M. A.; García, M. A.; Castellano, I.; Cano, Z.; Peláez, C. (2008). Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 26, Núm. 1, pp. 21-27.
- Gómez, R.; Magallanes, A. (2004). Impacto económico y potencial del uso de bajas densidades de siembra de cebada maltera de temporal en el altiplano Hidalguense. Centro de Investigación general. INIFAP. Folleto Técnico N° 3, p.1-24.
- Gregorich, E. G.; Carter, M. R.; Angers, D. A.; Monreal, C. M.; Ellert, M. H. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soil. *Can. J. Soil Sci.* 74: 367-385.



- Gutiérrez, C.M.A. (1995). Nutrición vegetal y uso de fertilizantes. Instituto Tecnológico de Sonora, Cd. Obregón, Son. 115 p.
- Hampp, E; E Bonadeo; M Bongiovanni; I Moreno. (2004). Aspectos genéticos de suelos con manchoneo. XVI Congreso Latinoamericano y XII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo.
- Hati, K. M., Swarup, A., Dwivedi, A. K., Misra, A.K. and Bandyopadhyay, K.K. (2007). Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119 (1-2): 127-134.
- Holeplass, H., B. R. Singh, and R. Lal. (2004). Carbon sequestration in soil aggregates under different crop rotation and nitrogen fertilization in an inceptisol in southeastern Norway. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 70: 167–177.
- Isla, R. (2004). Efectos de la salinidad de los suelos sobre los cultivos de cebada (*Hordeum vulgare* L.). Análisis de caracteres morfo-fisiológicos y su relación con la tolerancia a la salinidad. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida. Salamanca. España, p.5-17.
- ISTA. Internacional Seed Testing Association. (2003). Internacional Rules for Seed Testing. Rules. Zurich. Switzerland.
- Kabata-Pendias, A. (2000). Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press, Inc. Boca Raton. USA. pp. 365, 413.
- Lado, M., A. Paz, and M. Ben–Hur. (2004). Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation and soil loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 935–942.
- Lasat, M. M. (2000). The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil. American Association for the Advancement of Science, Environmental Science and Engineering Fellow. p. 33.
- Lazzari, M.; Landriscini, M.; Cantamutto, M.; Miglierina, A. M.; Rosell, R. A. (2001). Absorción de Nitrógeno por Cebada cervecera en dos suelos del sur Bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo* 19 (2):101.
- López-Perea P., Guzmán-Ortiz F. A., Santos-López E. M., Prieto-García F. y Román-Gutiérrez A. D. (2005). Evaluación de la calidad física de diferentes variedades de cebada (*Hordeum sativum* jess) cultivadas en los estados de Hidalgo y Tlaxcala, México. *Revista Chilena de Nutrición*. Vol. 32 (3). p. 247-253.
- Malvern Instrument, Inc. (2004). Potencial Zeta. Un curso completo en cinco minutos. Ed. Malver Inst. Catálogo Zeta-Meter. Westborough, MA 01581-1042, USA.
- Márquez, C. O., V. J. Garcia, C. A. Cambardella, R. C. Schultz, and T. M. Isenhardt. (2004). Aggregate size stability distribution and soil stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 725–735.
- Medina, J.; Volke, V. H.; González, J.; Galvis, A.; Santiago, M. J.; Cortés, J. I. (2006). Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en luvisoles del estado de Hidalgo. *Universidad y Ciencia*, Vol. 22(2): 175-189.



- Mendoza, J. E. (1997). Efecto de la acidez, aluminio y manganeso sobre los hongos de las micorrizas arbusculares en simbiosis con cereales tolerantes y sensibles a aluminio. Tesis Doctoral. INIA M539e. Universidad de Chile. Fac. de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Santiago de Chile. p.197.
- Montenegro G., H. 1991. Interpretación de las propiedades Físicas del Suelo (Textura, Estructura, Densidad, Aireación, etc.) En: Seminario-Taller "Fundamentos para la interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego". Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá D.E. Colombia.
- Moreno Álvarez M. T., Benito Matías L. F., Herrero Sierra N., Domínguez Lerena S., Peñuelas Rubira J. L. (2001). Actas del III Congreso Forestal Español. Granada., Mesa 3: 653-658.
- Noakes, M.; Clifton, P. M.; Nestel, P. J.; Le Leu, R. y McIntosh, G. (1996). Effect of high-amylose starch and oat bran on metabolic variables and bowel function in subjects with hypertriglyceridemia. *American Journal of Clinical Nutrition* 64(6): 944–951.
- Norma Oficial Mexicana. (2000). NOM-021-RECNAT-2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial de la Federación del 14 de febrero de 2001. p. 17.
- Norma Mexicana NMX-FF-043-SCFI-2003. (2003). Productos alimenticios no industrializados para consumo humano -cereal- cebada maltera (*Hordeum vulgare* L. y *Hordeum distichum* L.). Especificaciones y métodos de prueba. Publicada en el diario oficial el 18 de octubre del 2003.
- Núñez, J 1992. Fundamentos de Edafología. Editorial UNED, San José, Costa Rica. 2.
- Pierzynski, G.M., J.T. Sims, and G.F. Vance. 1994. Soils and environmental quality, Lewis Publi., Boca Raton, FL.
- Prieto, F.; Prieto, J.; de Ita, S.; Méndez, M. A.; Román, A. D. (2009). Correlación de potencial zeta (pZ) y parámetros físicoquímicos em extractos de saturación de suelos del Distrito de riego 03 del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10(2): 161-167.
- Pulido, M. A.; Lobo, D.; Lozano, Z. (2009). Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrocienc*, Vol. 43 (3): 221-230.
- Quiroga, A.; O. Ormeño y N. Peineman, (2001). Materia orgánica: un indicador de la calidad de los suelos relacionado con la productividad de los cultivos. *Boletín Divulgación Técnica* 70 EEA INTA Anguil, 28 pp.
- Rodríguez, S.A. (1992). Fertilizantes, nutrición vegetal. AGT editor. Segunda reimpresión. México, D.F.
- Rosell, RA; JC Gasparoni & JA Galantini. (2001). Soil organic matter evaluation. Pp. 311-322. En: R Lal; J Kimble; R Follett & B Stewart (eds.). *Assessment Methods for Soil Carbon*. Lewis Publishers, USA.
- Ruiz Estevez, Fernando - Venialgo, Crispín A. Gutierrez, Noemí C. - Ingaramo, Octavio - Briend, María C. (2004). Infiltración de agua en el suelo con diferentes usos en el Departamento 9 de Julio (Chaco). Universidad



- Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. 12(2): 70-74.
- Shepherd, T. G., S. Saggiar, R. H. Newman, C. W. Ross, and J. L. Dando. (2001). Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fraction in New Zealand soils. *Aust. J. Soil Res.* 39: 465–489.
 - Soil Survey Staff. (2006). *Key to Soil Taxonomy*. USDA Tenth Edition. Washington DC. 341 pp.
 - Unzueta, C. E.; Soto, M. A.; Martínez, J.; Pinto, C. F.; Cruz, F.; Hernández, S. (2007). Electroremediation: a novel technology for the remediation of contaminated soils. *Chemical Engineering International Symposium. Memory.* 102-106.
 - USDA. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica. (2000). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. Traducción al Español del: "Soil Quality Test Kit Guide". Instituto de Suelos. CRN–CNIA–INTA. Argentina. p.20-22.
 - USDA-NRCS. (1999). *Soil Quality Test Kit. Section II: Background and interpretive guide for individual tests*. Washington DC: Soil Quality Institute.
 - Vélez, M., Vélez., J. 2002. Capítulo 8: Infiltración. Universidad Nacional de Colombia, Unidad de Hidráulica
 - Vepraskas, M. J. (1994). Plant response mechanisms to soil compactation. p. 263-287. In: R. E. Wilkinson (Ed.). *Plant-environment interaction*. Dekker Publ. Co., New York.
 - Vera, J. A.; Grageda, O. A.; Vuelvas, M. A.; Peña, J. J. (2002). Absorción de Nitrógeno por el cultivo de cebada en relación con la disponibilidad de agua en el bajío, Guanajuato, México. *Terra Latinoamericana* 20(1): 57-64.
 - Volverás, B.; Amézquita, E. (2009). Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *Acta Agron. (Palmira)* 58(1): 35-39.

Sitios de internet

- <http://www.ege.fcen.uba.ar/materias/ambiental/ambiental/TPs/TP2%20BHidro.rico.pdf>



VII. Conclusiones generales

- Los valores de pH de los suelos en los tres municipios resultaron ser neutros según lo establecido por la norma en cuanto a clasificación. Los valores de potencial redox (Eh), indicaron que los suelos cebaderos de los municipios evaluados resultan reductores intermedios. Esta característica se corresponde también con suelos de bajas concentraciones de sales disueltas en la fase acuosa.
- Los contenidos bajos de arcilla y de materia orgánica en estos suelos, provocan una baja retención de agua por los mismos, implicando también por ello una relativa baja CIC con lo cual no son óptimamente aprovechados los nutrientes principales y las lixiviaciones y escurrimientos de los mismos pueden resultar elevadas. Estas capacidades de escurrimiento pueden afectar mantos acuíferos lo cual no ha sido estudiado hasta el momento. Sería necesario valorar las necesidades de incremento en materia orgánica más disponible, MO biodegradable.
- La baja retención de humedad de estos suelos, puede provocar poca germinación al inicio del cultivo, igualmente provoca poca humidificación de la MO.
- Los bajos contenidos de potasio (K) para los suelos de los tres municipios en estudio resultan poco favorables para el cultivo de cebada que requiere concentraciones elevadas de dicho metal, en sus primeras etapas de desarrollo. Resulta entonces perjudicial para el rendimiento del cultivo.
- Los altos contenidos en sodio, manifestaron una tendencia a ir en aumento en las diferentes fases o etapas de desarrollo del cultivo, siendo ésta una tendencia atípica para este cultivo donde se conoce que el ritmo de absorción de materias minerales en la cebada es muy elevado al comienzo de la fase vegetativa, disminuyendo después hasta llegar a anularse.
- Los espectros de energía dispersiva (EDS) permitieron corroborar la presencia de las especies analizadas, como por ejemplo, altas cantidades de silicio y aluminio que corroboran suelos con texturas arenosas, o los bajos contenidos de potasio.
- De los metales como el níquel y el plomo sólo se observó su presencia en el cultivo en los casos de donde se regó con agua contaminada con los mismos. En el caso del plomo se observó una tendencia a ser absorbido más ampliamente por la raíz que el caso de níquel; esto conllevó a apreciar una mayor migración de este elemento a otros órganos del cultivo, llegando a encontrarse concentraciones importantes de plomo en grano, no así de níquel. Esto puede considerarse una afectación que limitaría la calidad del cultivo para la producción de malta y cerveza (rechazo de la producción).



- Se ha evaluado el cultivo de cebada maltera en los municipios de Apan, Almoloya y Emiliano Zapata de manera integral por medio de análisis proximales y se ha podido determinar por órganos del cultivo y al momento de la cosecha, su composición. Esto ha permitido valorar cuales de sus constituyentes presentan algún contenido relevante que afecte a la calidad del producto; entre ellos destacan los valores de baja retención de humedad en granos, altos contenidos en cenizas, asociados a altos contenidos de óxidos metálicos, bajos niveles de potasio en granos y desproporciones entre contenidos de K/Mg en hojas.
- Los resultados indican también un mayor grado de madurez en las cosechas logradas (por secado natural del cultivo para quedar dispuesto para las máquinas cosechadoras) en el municipio de Apan que en Almoloya y en E. Zapata. Este criterio coincide con los resultados de los suelos y sus calidades en los municipios, siendo los suelos de menor calidad el de E. Zapata.
- Los niveles de absorción de materias minerales en la cebada cultivada en los tres municipios resultan muy elevados y al parecer se produce al comienzo de la fase vegetativa, por aplicaciones de fertilizantes y algunas prácticas de encalado. Esto se manifiesta por los altos contenidos en cenizas (como óxidos metálicos que son bioacumulados en órganos del cultivo). Se han encontrado valores que en suma varían entre 21-30%, es decir entre 5 y 6 veces superiores a las cifras reportadas como normales.
- Los resultados de nitrógeno proteico, a pesar de encontrarse en valores idóneos para los granos de cebada con calidad maltera, pueden ser debidos a las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados durante la etapa vegetativa ya que no fueron encontrados en suelos. Debe destacarse que por las características franco arenosas de los suelos, el N no es fácilmente retenido y puede ser bioacumulado en los inicios del desarrollo de la planta.
- Se puede considerar de lo anterior que el uso continuado de un sistema de monocultivo por más de 40 años en estos municipios ha propiciado serios cambios de las texturas de los suelos. Por ello hay relativos bajos valores de materia orgánica disponible, bajos contenidos de nitrógeno y bajas capacidades de retención de agua y de intercambio catiónico.
- La composición proximal por contenidos en fibras, grasas y carbohidratos pueden considerarse sin afectaciones y normales.
- Sin embargo en cuanto a contenidos metálicos se concluye que en niveles de sodio y calcio resultan elevados, lo que está en correspondencia con los altos contenidos en cenizas y al parecer las prácticas de aplicaciones de fertilizantes inorgánicos y de encalado de suelos.



- Por otra parte se concluye que los niveles de potasio resultan despreciables, lo cual fue observado en todos los órganos del cultivo: esto se corresponde con los despreciables niveles en suelos y además, esta carencia de potasio puede provocar una disminución en la calidad cervecera y una disminución a la resistencia al encamado de las variedades cultivadas.
- Los contenidos de plomo encontrados en los granos puede ser causante de una disminución de la calidad para la producción de malta.
- En los resultados de los análisis de níquel se concluye que son consecuencia normal para el desarrollo metabólico de la planta, coincidiendo con lo reportado por varios autores.
- Se concluye que las afectaciones al rendimiento en las cosechas por fisiopatías de encamado se deben no a los niveles de nitrógeno en el cultivo, sino a la carencia de potasio.
- Los indicadores propuestos y utilizados para evaluar la calidad del suelo (ICS), cumplen con los criterios requeridos para su uso como indicadores. Son un número mínimo de variables del suelo que integran información de otras variables asociadas, incorporan indicadores físicos, químicos y fisicoquímicos, y son de fácil medición. Los resultados representan una instantánea para la situación de los años 2007–2010 en los suelos cebaderos del sur del estado de Hidalgo.
- El índice de calidad promedio de los suelos (ICS) de esta región fue de 0.50 lo cual lo ubica en la clase 3, de moderada calidad de suelos. Este valor está fuertemente influenciado por los bajos valores de COS, como la propiedad que más está afectando estos suelos.
- Esta disminución del COS resulta la causa principal también de los valores bajos de estabilidad de agregados e infiltración y un indicador de los valores de densidad aparente. Estos cambios en las propiedades físicas afectan la condición superficial del suelo provocando un incremento de los procesos de erosión, con la consiguiente pérdida de espesor del horizonte superficial, reflejada por el indicador correspondiente.
- Siendo la primera ocasión que se reportan indicadores y valores para índices de calidad en cebadas malteras (ICCM) y la aplicación de una metodología para evaluaciones rápidas de estos indicadores, se puede concluir que el indicador que presentó el menor valor en promedio para los tres municipios, fue el porcentaje de humedad de los granos (0.43), influenciado principalmente por los suelos con menores capacidades de retención de agua.



- El mayor valor correspondió a los contenidos de materia grasa (0.91), considerándose como valores de muy buena calidad.
- El promedio general de la calidad de los granos de cebada maltera que se cultivan en la región sur del estado de Hidalgo fue ICCM=0.69, no habiendo diferencias significativas entre los tres municipios.
- En cuanto a peso hectolitro, contenidos en proteínas y fibras dietéticas, clasifican de moderada a buena calidad. Por el poder de germinación los granos de la región clasifican de buena a muy alta calidad, sin embargo los granos cosechados en el municipio de E. Zapata, resultaron ser los menos viables.
- Los métodos colorimétricos ofrecieron mejores resultados que los métodos germinativos para evaluar la facultad germinativa de las semillas de cebada.
- Se concluye que el método de tinción con índigo carmín puede ser utilizado en sustitución del método del tetrazolio por cuanto ofrece mejores resultados, más precisos y representa menor costo de reactivo y mayor estabilidad de la solución que se prepara.



VIII. Logros y Perspectivas

De todo el desarrollo de esta investigación, se han obtenido los siguientes logros:

a) **Presentaciones de Congresos y Eventos Científicos**

- Primer Foro Internacional y 8vo Seminario de Investigaciones en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Noviembre 2008.
- VI Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencias. Centro de Investigaciones Óptica. León, Guanajuato, Mayo 2009.
- VIII Congreso Internacional y XIV Nacional de Ciencias Ambientales y 3er Congreso de Medio Ambiente, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Junio 2009.
- Congreso de Ciencias Ambientales COPIME, Buenos Aires, Argentina, Octubre 2009.
- Segundo Foro Internacional y 9no Seminario de Investigaciones en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Noviembre 2009.
- VII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencias. Centro de Investigaciones Óptica. León, Guanajuato, Mayo 2010.
- Primer Congreso Multidisciplinario de Ciencias Aplicadas en Latinoamérica (COMCAPLA 2010), Nicaragua, Noviembre 2010.

b) **Publicación de artículos**

- Presencia de metales pesados en cultivos de Actopan e Ixmiquilpan, Valle del Mezquital, México, por riego con aguas negras. **Revista Lat. Am. Rec. Nat. México** (Diciembre 2007) Vol. 3 (2), p. 100-111.
- Contaminación y fitotoxicidad en plantas, por metales pesados provenientes de suelos, agua y otras fuentes. A Review. **Revista Tropical and Subtropical Agroecosystems. México** (Enero, 2009). Vol. 10 (1), p.29-44.
- Correlación potencial “z” y parámetros fisicoquímicos en extractos de saturación de suelos de Actopan-Ixmiquilpan, Hidalgo, México. **Revista Tropical and Subtropical Agroecosystems México** (Mayo 2009). Vol 10 (2), p.161-167.



- Degradación del almidón de cebada (*Hordeum sativum* Jess.) por gelatinización. **Revista Investigación, Biodiversidad y desarrollo. Colombia** (Mayo 2009), Vol. 28 (2), p.123-134.
- Evaluación de la bioacumulación de arsénico en cebada maltera (*Hordeum distichon*) por etapas del desarrollo. **Revista Agricultura Técnica en México** (Enero-Marzo 2010) Vol. 36(1) p. 37-44
- Acetilación y caracterización del almidón de cebada. **Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, México** (Noviembre 2010) 6(1): 32-43
- Soil quality in terms of physical-chemical-metal contents for barely (*Hordeum vulgare*) production in the state of Hidalgo, Mexico. **American Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. Pakistán** (Marzo 2011) Vol. 10(2):230-237.
- Comparación de métodos para determinar poder germinativo en *Hordeum distichon* L. calidad maltera de Apan, Almoloya y Emiliano Zapata, Hidalgo, México. **Revista Multiciencias. Venezuela** (Aceptado en Mayo 2011) Refer: 5249-2010.

c) Aportes Científicos

- El indicador de potencial zeta (pZ), es la primera vez que se utiliza para evaluar la estabilidad del suelo y sirve como un indicador cualitativo de la actividad biológica, flujo de energía, y desarrollo del ciclo de nutrientes.
- Se tomó como criterio de máximo y mínimo lo reportado en las bibliografía acerca de que a valores < -30 mV y $> +30$ mV, resultan estables las suspensiones coloidales de extractos de saturación de suelos.
- El incremento de la capacidad de infiltración del suelo frente al agua (generalmente por efecto temporal) así como el aumento en la estabilidad de los agregados frente al agua y a los agentes mecánicos, pueden estar regidas por una acción como la disminución del potencial Zeta (pZ) de las partículas del suelo.
- Las sales iónicas que pueden solubilizarse totalmente en medios acuosos no pueden ser clasificadas como coloides ya que se encuentran en la fase continua y por lo tanto su pZ, es muy pequeño. En la mayoría de los suelos el potencial Zeta es negativo debido a que la superficie del suelo generalmente tiene carga negativa. Con el incremento de la acidez, el pZ se hace menos negativo y, en algunos casos, pueda alcanzar valores positivos. Estos cambios afectan la velocidad del flujo electrosmótico, ya



que se ha observado que la tasa de flujo decrece cuando el pH del electrolito se acerca a la neutralidad o se incrementa la alcalinidad.

- Se estableció un índice de calidad de suelos (ICS) productores de cebada en tres Municipios del Sur del Estado de Hidalgo. Para la interpretación del ICS se utilizó una escala de transformación en cinco clases de calidad de suelo, desde muy alta a muy baja calidad.
- Se estableció un índice de calidad de granos de cebada maltera (ICCM). Para la interpretación del ICCM se utilizó una escala de transformación que agrupó tres clases de calidad de granos: alta, moderada y baja calidad.
- Se propone el método colorimétrico del índigo carmín como método alternativo para ser utilizado como predictor del poder germinativo de las semillas de cebada.

d) Perspectivas.

- Continuar estudios de correlaciones en suelos-cultivo y monitorear en esta región por varios años, los ICS e ICCM propuestos. Extrapolar estas propuestas a otras regiones productoras de cebada maltera.
- Preparar otras publicaciones como:
 - * Establecimiento de indicadores e índices para evaluación rápida de calidad de suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo México. Revista tentativa: Sociedad Americana de Suelos.
 - * Establecimiento de indicadores e índices para evaluación rápida de calidad de cebada maltera (ICCM) cosechada en el sur del estado de Hidalgo, México. Revista tentativa: Agricultura Técnica de México o Journal Cereal Science, or Agronomy Journal.