



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**EFFECTOS DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS EN FRUTOS Y  
HORTALIZAS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**QUÍMICA DE ALIMENTOS**

**PRESENTA**

**ISABEL MENDOZA TORRES**



**MÉXICO, D.F.**

**2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**      **Profesor:**    **ENRIQUE ADELAIDO BRAVO MEDINA**

**VOCAL:**            **Profesor:**    **MIGUEL ANGEL HIDALGO TORRES**

**SECRETARIO:**    **Profesor:**    **LUCÍA CORNEJO BARRERA**

**1er. SUPLENTE:**   **Profesor:**    **JUAN DIEGO ORTIZ PALMA PÉREZ**

**2° SUPLENTE:**    **Profesor:**    **ILIANA ELVIRA GONZÁLEZ HERNÁNDEZ**

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

## **ASESOR DEL TEMA:**

**ING. ENRIQUE ADELAIDO BRAVO MEDINA**

## **SUPERVISOR TÉCNICO:**

**DRA. CECILIA IZCAPA TREVIÑO**

## **SUSTENTANTE:**

**ISABEL MENDOZA TORRES**

# ÍNDICE GENERAL

	página
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
<b>Resumen.....</b>	<b>VI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Justificación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Hipótesis.....	3
<b>2. Marco teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Volcanes.....	4
2.1.1. Partes de un volcán.....	5
2.2. Actividad volcánica.....	5
2.2.1. Distribución geográfica.....	7
2.3. Vulcanismo en México.....	8
2.3.1. Volcán Popocatépetl.....	10
2.4. Ceniza volcánica.....	12
2.4.1. Composición.....	13
2.4.2. Efectos perjudiciales .....	13
2.5. Metales pesados .....	15
2.5.1. Comportamiento en el medio ambiente .....	16
2.5.2. Toxicología de metales pesados y otros elementos.....	19
2.5.3. Normatividad.....	28
<b>3. Antecedentes</b>	<b>29</b>
3.1. Volcanes que han causado daños al sector agropecuario .....	29
3.1.1. Volcán Chichonal, Chiapas .....	29
3.1.2. Volcán Puyehue, Chile.....	29
3.1.3. Volcán Popocatépetl.....	30
3.1.4. Volcán Nevado del Ruiz, Colombia.....	30
3.1.5. Volcán Tungurahua, Ecuador .....	30
3.1.6. Volcán Santiaguito, Guatemala .....	31

3.1.7. Volcán Pacaya, Guatemala.....	31
3.2. Elementos en las cenizas volcánicas.....	32
3.3. Metales pesados en suelos y cultivos.....	33
<b>4. Metodología</b>	<b>34</b>
4.1. Procedencia de las muestras.....	34
4.1.1. Cultivos y suelos.....	34
4.1.2. Ceniza volcánica.....	36
4.2. Muestreo y transporte.....	37
4.2.1. Cultivos.....	37
4.2.2. Suelos.....	37
4.3. Diagrama experimental.....	37
4.4. Procedimiento.....	38
4.4.1. Secado en estufa <sup>(1)</sup> .....	38
4.4.2. Humedad <sup>(2)</sup> .....	39
4.4.3. Lixiviación <sup>(3)</sup> .....	39
4.4.4. pH <sup>(4)</sup> .....	39
4.4.5. Sílice <sup>(5)</sup> .....	40
4.4.6. Boro <sup>(6)</sup> .....	40
4.4.7. Fluoruro <sup>(7)</sup> .....	40
4.4.8. Determinación de metales pesados.....	41
<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>43</b>
5.1. pH.....	43
5.2. Sílice.....	44
5.3. Boro.....	45
5.4. Fluoruro.....	46
5.5. Cadmio.....	47
5.6. Cobre.....	49
5.7. Cromo.....	50
5.8. Níquel.....	52
5.9. Plomo.....	53

<b>6. Conclusiones</b>	<b>57</b>
<b>7. Recomendaciones</b>	<b>59</b>
<b>8. Bibliografía</b>	<b>60</b>
<b>Apéndice</b>	<b>69</b>
A. Fundamento de metodologías .....	69
Secado en estufa.....	69
Determinación de humedad .....	69
Lixiviación.....	69
Determinación de pH.....	70
Determinación de Sílice .....	70
Determinación de Boro.....	70
Determinación de fluoruro.....	71
Digestión en horno de microondas.....	71
Determinación de cadmio, cobre, cromo, níquel y plomo por Espectrofotometría de Absorción Atómica.....	72
B. Campo de muestreo .....	73
C. Muestras .....	74
D. Porcentaje de humedad en suelos y cenizas.....	78
E. Cálculo .....	78
F. Recomendaciones ante caída de ceniza volcánica.....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

	página
Figura 1. Partes de un volcán .....	5
Figura 2. Distancia que alcanza la ceniza de acuerdo al porcentaje de fragmentación y tipo de erupción. ....	6
Figura 3. Zona circumpacífica (cinturón de fuego) .....	8
Figura 4. Principales volcanes de la Faja Volcánica Mexicana .....	9
Figura 5. Ubicación del volcán Popocatepetl. ....	11
Figura 6. Daños en cultivos por erupción del volcán Tungurahua .....	31
Figura 7. Puntos de muestreo del 15 de Noviembre del 2012 para suelos y cultivos. ....	34
Figura 8. Puntos de muestreo del 29 y 30 de Enero del 2013 para suelos y cultivos. ....	35
Figura 9. Puntos de muestreo de las cenizas analizadas .....	36
Figura 10. Campos de cultivo de fresa y fresa recolectada .....	37
Figura 11. Diagrama experimental para la determinación de metales pesados y otros elementos en la ceniza volcánica, suelos y cultivos. ....	38
Figura 12. Fresa recolectada. Fresa rebanada después de secarla en estufa. ....	39
Figura 13. Espectrofotómetro de absorción atómica .....	41
Figura 14. Curvas patrón de los elementos analizados. ....	42
Figura 17. pH de cenizas y suelos. ....	43
Figura 16. Concentración de sílice en cenizas y suelos. ....	44
Figura 17. Concentración de boro en cenizas y suelos. ....	45
Figura 18. Concentración de fluoruro en cenizas y suelos. ....	46
Figura 19. Concentración de cadmio en suelos y cultivos. ....	48
Figura 20. Concentración de cadmio en cenizas y suelos. ....	48
Figura 21. Concentración de cobre en suelos y cultivos. ....	49
Figura 22. Concentración de cobre en suelos y cenizas. ....	50
Figura 23. Concentración de cromo en suelos y cultivos. ....	51
Figura 24. Concentración de cromo en suelos y cenizas. ....	51
Figura 25. Concentración de níquel en suelos y cultivos. ....	52
Figura 26. Concentración de níquel en suelos y cenizas .....	53
Figura 27. Concentración de plomo en suelos y cultivos. ....	54
Figura 28. Concentración de plomo en suelos y cenizas .....	54
Figura 29. Lima .....	73
Figura 30. Campos de cultivo de calabaza. ....	73
Figura 31. Calabaza recolectada .....	73
Figura 32. Flor de calabaza .....	74
Figura 33. Chirimoya recolectada. Chirimoya después de la deshidratación. ....	74
Figura 34. Durazno recolectado. Durazno rebanado después de secarlo en estufa .....	75
Figura 35. Guayaba antes de cualquier tratamiento. Guayaba después de secarla en estufa . .	75
Figura 36. Calabaza recolectada. Calabaza rebanada después de secarla en estufa. ....	75
Figura 37. Flor de calabaza deshidratada. ....	76
Figura 38. Rábano recolectado y después de secarlo en estufa .....	76
Figura 39. Chirimoya .....	76
Figura 40. Cebolla recolectada. Cebolla rebanada después de secarla en estufa .....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

	página
Tabla 1. Volcanes con actividad reciente.....	10
Tabla 2. Efectos de la caída de ceniza volcánica sobre la agricultura .....	15
Tabla 3. Criterios de evaluación de un suelo con respecto al pH .....	18
Tabla 4. Efectos sobre la salud por ingestión de fluoruro en agua potable .....	26
Tabla 5. Elementos encontrados en ceniza volcánica de erupciones históricas .....	32
Tabla 6. Detalles por municipio de los cultivos y suelos muestreados .....	35
Tabla 7. Detalles por municipio de ceniza muestreada .....	36
Tabla 8. Concentraciones para la curva patrón de sílice .....	40
Tabla 9. Condición de las digestiones .....	41
Tabla 10. pH de suelos y cenizas .....	55
Tabla 11. Concentración de sílice, boro y fluoruro en suelos y cenizas .....	55
Tabla 12. Concentración de cadmio, cromo, cobre, níquel y plomo en cenizas.....	56
Tabla 13. Concentración de cadmio, cromo, cobre, níquel y plomo en suelos y cultivos.....	56
Tabla 14. Porcentaje de humedad de suelos .....	78



## Resumen

La actividad volcánica es un fenómeno que ha existido desde hace miles de años. El volcán Popocatepetl es uno de los 15 volcanes activos en México. Éste se manifiesta con exhalaciones de gases, vapores y cenizas.

Las cenizas volcánicas están compuestas principalmente por silicatos, minerales traza y algunos metales pesados es por ello que causa grandes impactos en el ambiente, en la agricultura y ganadería, en la salud de la población y en la economía, además representa un riesgo constante para los pobladores asentados en zonas aledañas a él quienes realizan sus actividades cotidianas y productivas. Así mismo, las cenizas pueden contaminar el agua con relativa facilidad.

El objetivo del presente trabajo fue determinar si el contenido de boro, cadmio, cobre, cromo, flúor, níquel, plomo y sílice presente en la ceniza volcánica afecta a los suelos y cultivos provenientes de las zonas cercanas al volcán Popocatepetl.

Se seleccionaron localidades aledañas al volcán como: Guadalupe Huexocoapan, Metepec, Paleorío, San Jerónimo Tecuanipan, Tochimilco, San Baltazar Atlimeyaya, San Juan Amecac, San Francisco Huilango y Tianguismanalco del *Estado de Puebla*; Tlamacas del *Estado de México*; Chihuahuita del *Estado de Morelos* y Xochimilco del *Distrito Federal*, donde se llevaron a cabo muestreos de cultivos, suelos y cenizas.

Se muestrearon cultivos de hortalizas, frutales y jícama. Entre las hortalizas, se tomaron muestras de calabaza, flor de calabaza, rábano y cebolla. En el grupo de frutales se tomaron muestras de fresa, chirimoya, durazno, guayaba, tejocote, naranja, lima y mandarina.

De los metales pesados analizados se mencionan qué cultivos los acumularon así como también aquellos cultivos en los que no se detectó algún metal pesado y por lo tanto pueden ser consumidos por la población sin riesgo alguno.

Se determinó si la concentración de metales pesados presentes en suelos y cultivos sobrepasa los límites que establece la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés).

# 1. Introducción

## 1.1 Justificación

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es un órgano administrativo desconcentrado que tiene por objeto estudiar, desarrollar, aplicar y coordinar tecnologías para la prevención y mitigación de desastres y sus efectos, promover la capacitación profesional y técnica sobre la materia, así como apoyar la difusión de medidas de preparación y autoprotección a la población ante la contingencia de un desastre.

Tiene las siguientes atribuciones:

- i. Investigar los peligros, riesgos y daños provenientes de agentes perturbadores que puedan dar lugar a desastres, integrando y ampliando los conocimientos de tales acontecimientos, en coordinación con las dependencias y entidades responsables;
- ii. Llevar a cabo la capacitación en materia de protección civil y prevención de desastres de los profesionales, especialistas y técnicos mexicanos;
- iii. Colaborar con otros países, particularmente de América Latina y del Caribe y con organismos internacionales, en actividades de capacitación, investigación, instrumentación y difusión en materia de prevención de desastres y protección civil, y sostener relaciones de intercambio y coordinarse con organismos e instituciones que realicen funciones semejantes o complementarias;
- iv. Difundir entre las autoridades correspondientes y la población en general, los resultados de los trabajos de investigación, instrumentación, estudio, análisis y recopilación de información, documentación e intercambio que realice, a través de publicaciones y actos académicos;
- v. Integrar un acervo de información y documentación que facilite a las autoridades competentes y a las instituciones interesadas, el estudio y análisis de aspectos específicos de prevención de desastres;
- vi. Asesorar y apoyar a los organismos e instituciones integrantes del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) en los aspectos técnicos de la prevención de desastres;
- vii. Instrumentar y, en su caso, operar redes de detección, monitoreo, pronóstico y medición de riesgos en cooperación con las dependencias y entidades responsables;
- viii. Administrar los recursos que le sean asignados, así como las aportaciones que reciba de otras personas, instituciones o países;
- ix. Apoyar a los consejos estatales de protección civil, proporcionándoles información para formular sus programas de prevención de desastres;
- x. Promover el desarrollo de programas de coordinación y colaboración en materia de prevención de desastres. (CENAPRED, 2012)

Con base en las atribuciones anteriores y en especial al numeral iv, los resultados del presente trabajo aportarán al CENAPRED elementos de juicio para evaluar los posibles daños a la salud de la población que vive en zonas cercanas a los volcanes activos del país y

consume frutas y hortalizas que han estado expuestas a las emisiones de cenizas de un volcán.

Se tiene registrado que a partir de Diciembre de 1994 el volcán Popocatepetl presentó un incremento en su actividad, es decir, emisión de cenizas volcánicas y gases que afectan directamente a las personas que habitan cerca de dicho volcán (De la Cruz- Reyna, 2004), es prioridad del CENAPRED alertar a la población en caso de existir contaminación de los elementos contenidos en la ceniza volcánica sobre los cultivos que consume la población.

Ante tal situación la población se ocupa en tomar medidas preventivas; sin embargo, aunque el fenómeno haya pasado, los daños pueden seguir ya que la ceniza depositada en el suelo se acumula, y es en estos suelos donde producen cultivos destinados para autoconsumo o venta, por esta razón el impacto en la salud no sólo podría darse por inhalación de cenizas o ingestión de agua contaminada sino también por consumir alimentos que, ya sea en su composición o capa superior, estuvieran contaminados.

La ceniza del volcán Popocatepetl se encontró que está compuesta por óxidos principalmente de sílice, aluminio y hierro, álcalis, metales pesados además de pequeñas cantidades de minerales (Martin del Pozzo *et al.*, 2001; Narváez *et al.*, 2004, OPS, 2005).

En estudios realizados se ha detectado presencia de cadmio, níquel y plomo en plantas así como también en suelo y agua destinadas para uso agrícola (Prieto *et al.*, 2009).

El riesgo que existe en los suelos por los altos niveles de metales pesados es que son elementos altamente tóxicos, no biodegradables y pueden ser acumulados en los organismos vivos. Cuando están presentes en el suelo, son fijados inicialmente por las plantas y, de este modo, comienza su transferencia a lo largo de la cadena alimenticia, transferencia caracterizada por su biomagnificación, lo cual implica que el hombre como último agente receptor de la cadena recibirá una mayor concentración de dicha sustancia tóxica en comparación con los organismos de los niveles inferiores de esta cadena (Navarro *et al.*, 2007; Prieto *et al.*, 2009; Hernández, 2011).

Determinar la concentración de metales pesados (cadmio, cobre, cromo, níquel y plomo) y otros elementos (boro, flúor y sílice) en suelos y cultivos provenientes de las zonas cercanas al volcán nos permitirá conocer si la frecuente caída de ceniza volcánica afecta a los cultivos sembrados en esa zona y consecuentemente existan riesgos de salud para la población que los consume.

## 1.2 Objetivos

Determinar el contenido de cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo, boro, fluoruro y sílice en la ceniza, suelos y cultivos provenientes de las zonas cercanas al volcán Popocatepetl.

Determinar si los resultados obtenidos sobrepasan los límites que establece la Norma Oficial Mexicana para cada cultivo.

Determinar si, dada la concentración de metales, los cultivos provenientes de las zonas cercanas al volcán Popocatepetl pueden ser consumidos por la población.

### 1.3 Hipótesis

Debido a la frecuente caída de ceniza volcánica, si se cultiva en zonas cercanas al volcán Popocatepetl entonces tanto los suelos como los cultivos estarán contaminados con metales pesados

Si los cultivos absorben los metales pesados presentes en la ceniza volcánica entonces sobrepasarán los límites establecidos por las Normas Oficiales.

Si los cultivos están contaminados con metales pesados entonces su consumo implicará un riesgo para la población.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Volcanes

La Tierra está compuesta por múltiples capas concéntricas, las cuales pueden ser clasificadas de acuerdo a su composición o a sus propiedades mecánicas. Por su composición se encuentra: la **corteza** es como una especie de cáscara relativamente delgada comparada con el diámetro del planeta, ésta incluye a los continentes y el fondo marino; el **manto terrestre** es una gruesa capa de material rocoso y el **núcleo** situado en el centro, que está a su vez conformado por dos capas, una externa y fluida, y otra interna sólida. Por sus propiedades mecánicas se encuentran (de afuera hacia adentro): la **litósfera** la cual se comporta como una capa rígida y se fractura como una tiza; la **astenósfera** que, a pesar de tener la misma composición que la litósfera, se comporta de manera plástica debido a que es sometida a mayor presión y temperatura; la **mesósfera**, a pesar de su resistencia, está compuesta por rocas que están muy calientes y son capaces de fluir de manera gradual; el **núcleo externo** es líquido y el **núcleo interno** ostenta una temperatura más elevada, es más resistente que el núcleo externo debido a la enorme presión y se comporta como un sólido (Gutiérrez *et al.*, 2006; Caselli *et al.*, 2011).

La litósfera está dividida en piezas irregulares que se denominan **placas**, las cuales están en continuo movimiento, ya que se deslizan sobre la capa ubicada inmediatamente por debajo (la astenósfera). Las placas se mueven constantemente, con velocidades que rondan varios centímetros por año, aunque estos movimientos puedan deformar el interior de las placas, son sus bordes los que se ven más afectados y deformados (Caselli *et al.*, 2011).

En la litósfera (corteza y manto superior) existe material rocoso y mineral que se funde parcialmente, generando una mezcla conocida con el nombre de **magma**, compuesta por silicatos, agua, burbujas (de hidrógeno, oxígeno, carbono, bromo y cloro) y sólidos dispersos. Los factores críticos para tal fusión parcial son el contenido de agua, la temperatura y la presión. El magma acumulado en la corteza no siempre sale a la superficie, en algunos casos permanece inmóvil por largo tiempo en el subsuelo, hasta que se enfría formando grandes estructuras de roca volcánica solidificada, que por lo general sólo aflora a la superficie cuando la porción de corteza que la cubre se erosiona (Gutiérrez *et al.*, 2006).

El sitio por donde es expulsado el magma a causa del movimiento de las placas tectónicas, formando una acumulación que por lo general toma una forma cónica se le conoce como cráter, alrededor del punto de salida se le denomina **volcán**. Los volcanes pueden surgir tanto en terreno terrestre como oceánico y normalmente se encuentran en los puntos de unión de dos o más placas tectónicas (Tavera *et al.*, 2003).

Los volcanes que se forman por la acumulación de materiales emitidos por varias erupciones a lo largo del tiempo se llaman **poligenéticos** un ejemplo de este tipo es el volcán Popocatepetl. Los que nacen, desarrollan una erupción que puede durar algunos años y se extinguen sin volver a tener actividad se les llama **monogenéticos**, un ejemplo de este tipo es el volcán Parícutín) (De la Cruz- Reyna, 2004).

### 2.1.1. Partes de un volcán

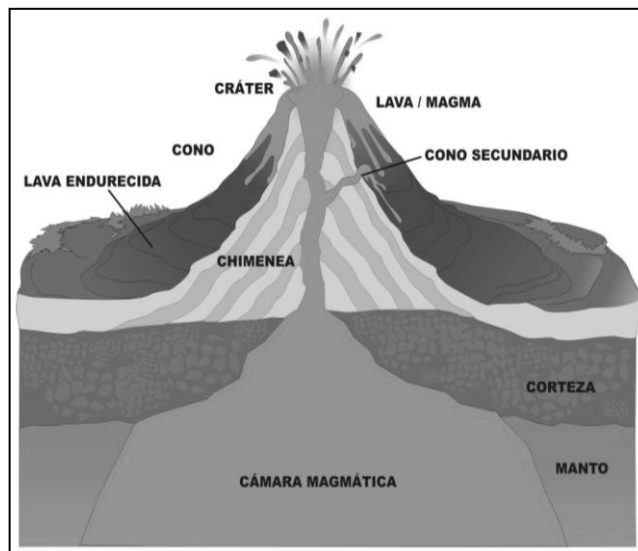
**Cámara Magmática**, es la zona donde se produce y almacena el magma del volcán que al ser expulsado recibe el nombre de lava. Se comunica con el cráter del volcán a través de un conducto conocido como chimenea.

**Chimenea**, es el conducto por donde asciende el magma hasta llegar al cráter. Durante su ascenso, el magma puede arrancar rocas de las paredes de la chimenea e incorporarlos a la corriente ascendente para luego ser expulsados a la superficie.

**Cráter**, es por donde se expulsan los materiales volcánicos (lavas, gases, vapores, cenizas, etc.) durante una erupción. Puede presentar la forma de un embudo o cono invertido.

**Cono Volcánico**, es el conjunto de materiales volcánicos que durante una erupción caen alrededor del cráter. El cono volcánico puede crecer considerablemente dependiendo de la intensidad de las erupciones; las explosiones eruptivas intensas podrían generar fracturas en dicho cono, originando nuevos cráteres en los extremos del volcán (Tavera *et al.*, 2003).

En la Figura 1 se muestran las partes de un volcán.



**Figura 1.** Partes de un volcán (Alonso, O., 2013).

## 2.2. Actividad volcánica

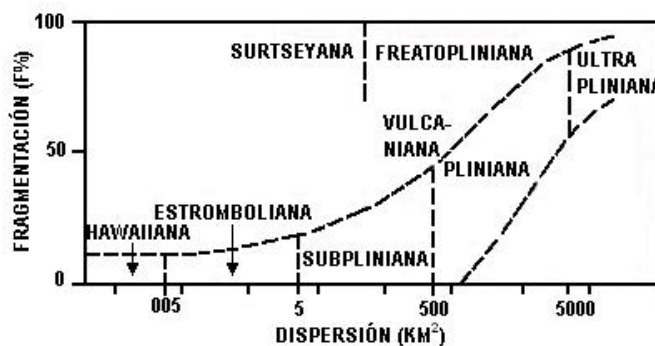
La actividad volcánica genera beneficios de enriquecimiento y renovación de la atmósfera, la hidrósfera, la litósfera y, por tanto, de la biósfera.

Por lo general, se dice que un volcán es activo cuando existe magma fundido en su interior o cuando puede recibir nuevas aportaciones de magma y por tanto mantiene el potencial de producir erupciones. En muchos casos es difícil decir si un volcán es activo o no, por lo que entonces se dice que es activo si ha mostrado algún tipo de actividad eruptiva en los últimos 10,000 años (De la Cruz-Reyna, 2004). Las erupciones volcánicas son entonces mezclas de magma, gases volcánicos que se separan de éste (gases sulfurosos, dióxido de carbono,

dióxido de azufre, hidrógeno, nitrógeno, ácidos clorhídrico y sulfúrico, metano, cloruros volátiles, vapor de agua, entre otros) y fragmentos de rocas de la corteza (Gutiérrez *et al.*, 2006).

Los materiales rocosos fragmentados emitidos por una erupción se denominan **piroclastos**, éstos se forman a medida que el magma asciende por la chimenea, donde los gases se expanden rápidamente por la disminución de la presión, generando una espuma en el fundido. De esta manera, entre las burbujas quedan paredes o tabiques finos del fundido, que se enfrían rápidamente dando lugar a partículas finas de vidrio, muy puntiagudas (Caselli *et al.*, 2011). Qué tan fina sea la fragmentación de los piroclastos depende de la intensidad de la erupción explosiva. Una forma genérica de referirse a los productos piroclásticos, cualquiera que sea su forma, es **tefra**. A los fragmentos de tefra con tamaño entre 0.004 y 2 milímetros se les llama **ceniza volcánica** (varía en apariencia según el tipo de volcán y la forma de erupción, su color puede ir desde un tono gris hasta el negro), a los que tienen entre 2 y 64 milímetros **lapilli**, y los mayores a 64 milímetros **bloques** o **bombas** dependiendo de su morfología (Fisher, 1966; Fisher *et al.*, 1984; De la Cruz-Reyna, 2004).

El viento y el tipo de erupción son los dos factores principales que controlan la dispersión de la ceniza de un volcán que entra en erupción. El tipo de erupción determinará el volumen y el tamaño de ceniza, así como la variedad de altitudes a la cual la ceniza es expulsada (Figura 2). Durante una explosión, los fragmentos más gruesos caen rápidamente en las cercanías del volcán, sólo la ceniza más fina es arrastrada por el viento a grandes distancias que van de cientos hasta miles de kilómetros, y puede afectar áreas muy extensas y a un gran número de personas. También alcanzan grandes alturas en la atmósfera, donde pueden permanecer por períodos prolongados.



**Figura 2.** Distancia que alcanza la ceniza de acuerdo al porcentaje de fragmentación y tipo de erupción (Gutiérrez *et al.*, 2006).

En las grandes erupciones, la columna eruptiva puede alcanzar alturas de hasta 55 kilómetros, aunque lo común es de 3 a 10 kilómetros. La velocidad con que el viento transporta las cenizas varía de <10 a <100 km/h. Los depósitos pueden extenderse miles de kilómetros en la dirección del viento, aunque los depósitos resultantes son muy delgados a distancia. El material con un tamaño menor de 64 milímetros alcanza su equilibrio térmico al introducirse en la atmósfera, aunque las pómez pueden estar por encima de la temperatura de ignición hasta 30 kilómetros de altura (Gutiérrez *et al.*, 2006).

Las emanaciones gaseosas de los volcanes están constituidas en su mayoría por vapor de agua, dióxido de azufre, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico. El dióxido de azufre producido reacciona con el vapor de agua, forma ácido

sulfúrico y se deposita sobre las partículas de ceniza; el ácido clorhídrico y el ácido fluorhídrico pueden cubrir dichas partículas (Martin del Pozzo *et al.*, 2001).

En diferentes trabajos experimentales se ha encontrado que la influencia de un factor ambiental (físico, químico o biológico) representa una fuente potencial de desequilibrio en los sistemas reguladores de los organismos; la naturaleza, al detectar la presencia de un nuevo elemento en el ecosistema, cambia las características del recurso afectado (Fajer *et al.*, 1989; Romieu *et al.*, 1996; Sorokin *et al.*, 2003).

Los factores que causan un impacto notable en el ambiente son: fluidos volcánicos en los cuerpos de agua tanto subterráneos como superficiales, gases emitidos a la atmósfera, que pueden contribuir al aumento de la temperatura media del planeta -con el llamado efecto invernadero- y a la alteración de la calidad del aire, la presencia de especies azufradas en la atmósfera durante años con efectos de lluvia ácida por algún tiempo, la ceniza volcánica fácilmente arrastrada por el viento a grandes distancias y material particulado más fino que puede permanecer indefinidamente en suspensión (OPS, 2005).

### **2.2.1. Distribución geográfica**

La distribución global de la actividad volcánica no es aleatoria sino que presenta un modelo definido por los procesos tectónicos (interacciones interplaca e intraplaca) (Gutiérrez *et al.*, 2006).

En el mundo existen alrededor de 1300 volcanes continentales activos. De éstos, 550 han tenido alguna erupción en tiempos históricos y han afectado a seres humanos. Los volcanes activos mantienen una tasa eruptiva global de 50 a 60 erupciones por año, y en promedio, existen en todo momento unos 20 volcanes en actividad en distintos puntos del globo (Simkin y Siebert, 1994).

A lo largo de la historia, poblaciones asentadas cerca de esos 550 volcanes, en distintas partes del mundo, han soportado los efectos de la actividad volcánica. Se estima que cerca de 270,000 personas han perecido por efecto de desastres volcánicos desde el año de 1700 de nuestra era (Gutiérrez *et al.*, 2006).

#### **2.2.1.1. Zonas volcánicas**

De acuerdo a estudios realizados por geólogos se sabe que en el mundo existen cinco zonas diferenciadas, donde la actividad volcánica es mayor (Tavera *et al.*, 2003; Gutiérrez *et al.*, 2006).

*Zona circumpacífica* (también llamada cinturón de fuego). Se caracteriza por concentrar las zonas de subducción más importantes del mundo. Este cinturón se extiende circularmente sobre 40 000 kilómetros alrededor de todo el Océano Pacífico (el cual reposa sobre varias placas tectónicas) y considera costas de América, Asia y Oceanía, originándose en la cordillera de los Andes y Montañas Rocosas. Tiene 454 volcanes y concentra más del 75% de los volcanes activos e inactivos del mundo (Figura 3). Los volcanes más activos de esta zona se



encuentran en Alaska, Hawaii, Japón, Filipinas, Perú, Chile, Argentina, Colombia, México y Estados Unidos de Norteamérica.

*Zona asiático-mediterránea.* Se extienden transversalmente de oeste a este desde el Océano Atlántico hasta el Océano Pacífico pasando por el Mediterráneo y el Continente Asiático. Se distinguen volcanes en Italia; en Indonesia coincide con la zona circumpacífica.

*Zona índica.* Rodea al Océano Índico y por Sumatra-Java enlaza con la zona circumpacífica. Se distinguen montañas submarinas con vulcanismo activo como las Islas Reunión y las Islas Comores en el estrecho de Madagascar.

*Zona atlántica.* Recorre, por el centro, el océano Atlántico de Norte a Sur. En esta zona destacan los volcanes de Islandia, de las Islas de la Ascensión y el volcán Santa Elena. Asociados a fallas transformantes se distinguen los archipiélagos de Azores y Canarias.

*Zona africana.* Esta zona considera a todos los volcanes ubicados en el rift continental. Se extiende desde Mozambique en África hasta Turquía. Se distinguen volcanes como el Kilimanjaro, Meru, Kenia, Niragongo, Erta-Ale, Fantalé. Entre Etiopía y Somalia nace un nuevo Océano, con la presencia de una dorsal Oceánica que separa a la placa Africana de la Arábica en la cual existen muchos volcanes.



Figura 3. Zona circumpacífica (cinturón de fuego)

[<http://detrimentaltsunamiof2004.weebly.com/qa.html>. Fecha última de acceso 3 de Octubre del 2013].

### 2.3. Vulcanismo en México

En México hay más de 2,000 volcanes de los cuales 15 se consideran activos (Figura 4). México junto con Centroamérica y la zona andina constituyen las regiones geográficas con mayor actividad volcánica en el mundo. La tasa de erupción promedio durante los últimos 500 años ha sido de cerca de 15 erupciones de diversos tamaños por siglo (Plan de contingencias del volcán Popocatépetl, 1995; Gutiérrez *et al.*, 2006).

La mayoría de los volcanes de México se localizan en la zona circumpacífica. Gran parte del vulcanismo está relacionado con las interacciones entre las placas de Rivera y Cocos con la

gran placa Norteamericana; se manifiesta principalmente en lo que llaman Faja Volcánica Mexicana (Gutiérrez *et al.*, 2006).

En México, el volcán más alto es el Pico de Orizaba o Citlaltépetl con 5,747 metros de altura sobre el nivel del mar, seguido por el Popocatepetl con 5,452 metros y el Iztaccíhuatl con 5,286 metros, éstos dos últimos están unidos por la parte norte mediante un paso montañoso conocido como Paso de Cortés (Club planeta, 2013).

Aunque la mayoría de las erupciones han sido de magnitudes bajas, otras han sido destructivas en grado moderado, como las del Nevado de Colima en 1576 y 1818, o las del San Martín Tuxtla en 1664 y 1793; y en mayor grado, como ocurrió en la erupción del volcán El Chichón en 1982, que causó numerosas víctimas, devastó 150 km<sup>2</sup> de áreas boscosas y de cultivo, y mató varios miles de cabezas de ganado. Otras erupciones, como el nacimiento del volcán monogenético Parícutín han producido flujos de lava, provocando la destrucción de poblaciones y tierras cultivables pero sin causar víctimas. Casos análogos de volcanes monogenéticos recientes son el Jorullo, que nació en Michoacán en 1759, y el Xitle, que nació en el Valle de México, hace unos 1670 años (De la Cruz-Reyna, 2004).



**Figura 4.** Principales volcanes de la Faja Volcánica Mexicana (Simkin *et al.*, 1994).

En la Tabla 1 se muestran los principales volcanes mexicanos que han desarrollado algún tipo de actividad eruptiva en tiempos geológicamente recientes.

**Tabla 1.** Volcanes con actividad reciente

<b>Volcanes</b>	<b>Estado</b>
<b>Tres Vírgenes</b>	Baja California Sur
<b>Bárcena</b>	Isla Benedicto, Colima
<b>Everman</b>	Isla Socorro, Colima
<b>Volcán de Fuego</b>	Colima
<b>Sangangüey</b>	Nayarit
<b>Ceboruco</b>	Nayarit
<b>Paricutín</b>	Michoacán
<b>Jorullo</b>	Michoacán
<b>Xitle</b>	Distrito Federal
<b>Popocatepetl</b>	Edo. de México, Puebla y Morelos
<b>Pico de Orizaba</b>	Puebla y Veracruz
<b>San Martín</b>	Veracruz
<b>Chichón</b>	Chiapas
<b>Tacaná</b>	Chiapas y Guatemala

(De la Cruz-Reyna, 2004)

### ***Faja Volcánica Mexicana***

La Faja Volcánica Mexicana (FVM) es una elevación volcánica con orientación este-oeste, que se extiende más de 1,200 Kilómetros y su ancho varía de 20 a 150 Kilómetros ubicada sobre el paralelo 19º; alberga a los principales volcanes activos del país.

La FVM se caracteriza por la diversidad de volcanes, desde los grandes que se han formado por capas de ceniza volcánica, fragmentos y corrientes de lava intercaladas (estratovolcanes), hasta extensos campos de pequeños conos de cenizas. Por esta razón, el vulcanismo que se desarrolla a lo largo de la FVM es extremadamente variado; desde actividad efusiva, cuyos productos más importantes son los derrames de lava, hasta erupciones altamente explosivas con predominio de depósitos piroclásticos tanto de flujo como caída de ceniza (De la Cruz-Reyna, 2004). Sin embargo, existen otros centros eruptivos en el país que no pertenecen a la FVM, como son los volcanes del estado de Chiapas, Oaxaca y el volcán Tres Vírgenes en Baja California Norte.

La FVM representa un riesgo para la población, ya que atraviesa las zonas más pobladas de México. Una erupción volcánica puede lanzar a la atmósfera gases tóxicos, nubes de fuego y material incandescente, y provocar deslaves que pueden poner en grave peligro a los habitantes de las zonas cercanas. El grado de riesgo puede estimarse por medio de la relación que existiría entre la violencia de la erupción y el número de personas que podrían ser afectadas (Gutiérrez *et al.*, 2006).

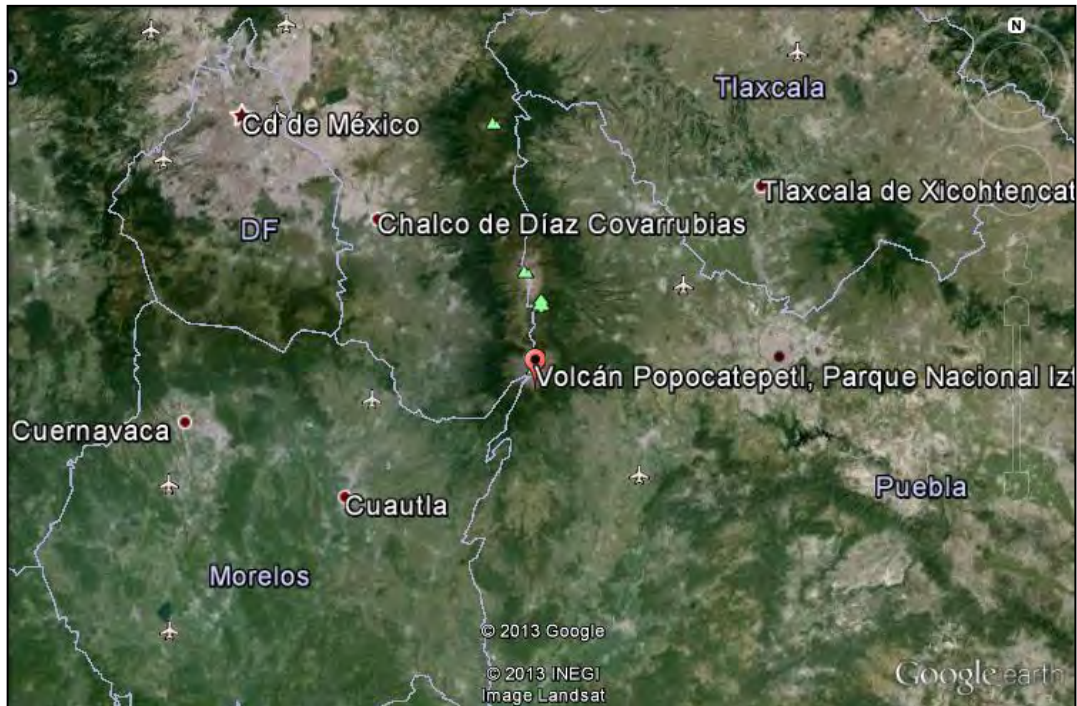
#### **2.3.1. Volcán Popocatepetl**

Pertenece a los estratovolcanes, su forma es cónica simétrica con una altura sobre el nivel del mar de 5,452 metros. El cráter en la parte más ancha mide 612 metros y en la más angosta 400 metros. Tiene una profundidad máxima de 505 metros y es el vértice donde limitan los estados de México, Puebla y Morelos.

Las dos principales cimas del Popocatepetl son el Pico Mayor y el Espinazo del Diablo, ambas alrededor del cráter.

### **2.3.1.1. Ubicación**

Está ubicado en los estados de México, Puebla y Morelos. Al sur de la Sierra Volcánica Transversal que constituye la espina dorsal del Altiplano Mexicano. Colinda con los municipios de: Tlalmanalco, Amecameca, Atlauta y Ecatzingo (Estado de México); Tetela del Volcán (Estado de Morelos); Huejotzingo, San Salvador el Verde, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco (Estado de Puebla). En la Figura 5 se observa un mapa con la ubicación del volcán y los estados aledaños.



**Figura 5.** Ubicación del volcán Popocatepetl. (Tomado de Google Earth, 13 Agosto 2013).

### **2.3.1.2. Clima, flora y fauna**

La parte más alta generalmente está cubierta de nieve, en la parte baja la temperatura es mayor.

En las partes altas del volcán se pueden encontrar bosques de pino, oyamel, ayacahuite, encino madroño, palo blanco, ciprés, así como cedro blanco y rojo. En la parte media baja pastizales y en la parte más baja gramíneas, y frutales como zarzamora, fresa y tejocote.

En cuanto a la fauna, en la sierra se encuentran venado cola blanca, gallina de monte, halcón, cuervo, codorniz pinta, águila, gavilán, paloma de collar, coyote, tejón, zorrillo, ardilla y algunos reptiles (Club planeta, 2013).

### **2.3.1.3. Actividad**

El Popocatepetl es uno de los volcanes más activos del país, después de setenta años de inactividad hubo un paulatino incremento, reinició su actividad el 21 de Diciembre de 1994. En los últimos 17 años ha tenido etapas efusivas y explosivas asociadas con el crecimiento y destrucción de domos de lava en el interior del cráter.

Un análisis de la morfología del volcán y su evolución geológica muestran que se trata de un volcán que ha estado activo por más de medio millón de años y que ha presentado varias etapas de crecimiento, que formaron al menos tres volcanes previos los cuales fueron destruidos por erupciones extraordinariamente grandes. El cono moderno está construido sobre los restos de estos volcanes.

Sus cenizas han alcanzado los estados de Puebla y México, incluso poblaciones más lejanas como Querétaro y Veracruz. También ha presentado en dos ocasiones flujos piroclásticos y lahares, que llegaron hasta Santiago Xalitzintla, Puebla. A lo largo de su historia reciente, el volcán Popocatepetl ha presentado actividad recurrente con erupciones similares a la actual, pero de diferente magnitud (Espinasa-Pereña *et al.*, 2006).

En el pasado también se han registrado erupciones explosivas mayores, que afectaron severamente las zonas cercanas (Siebe *et al.*, 1996; Plunket *et al.*, 2008).

## **2.4. Ceniza volcánica**

La caída de ceniza volcánica es parte de un ciclo natural, ésta es un aporte de nutrientes minerales que puede variar en su composición mineralógica; la variabilidad es alta entre los distintos volcanes, incluso cambia con el tiempo desde un mismo centro eruptivo (Narváez *et al.*, 2004). Estos episodios de la naturaleza son una fuente principal de contaminación y se convierten en desastres cuando impactan a las poblaciones afectando su salud, la economía regional y la calidad de los recursos naturales (agua, aire y suelo) de los ecosistemas de la zona de riesgo volcánico, aportando una cantidad considerable de contaminantes, principalmente a la atmósfera. Sus consecuencias pueden sentirse a kilómetros del volcán por la acción del viento (OPS, 2005).

Los grandes depósitos de cenizas pueden incorporarse a suelos y convertirse con el paso del tiempo en un área volcánica. La fertilidad de estos suelos se debe a viejos depósitos de cenizas, razón por la cual estas zonas volcánicas se encuentran con frecuencia densamente pobladas. Dentro de los principales riesgos volcánicos destacan la emisión de ceniza y gases, éstos se relacionan con la cantidad y el número de exposiciones a dichos eventos (Rivera *et al.*, 2005). Si la emisión de cenizas volcánicas es frecuente causa problemas en la salud a mediano y largo plazo. Es importante mencionar que el efecto dañino que causan las cenizas en la salud es diferente cuando provienen de un evento explosivo reciente que cuando se trata de ceniza sedimentada (Wilson *et al.*, 2000).

Las cenizas expulsadas durante una erupción pueden atrapar parte del gas liberado en la columna eruptiva, razón por la cual se analizan lixiviados de las cenizas (“ceniza lavada”) (Caselli *et al.*, 2011).

### 2.4.1. Composición

En estudios realizados a la ceniza del volcán Popocatepetl se encontró que contiene *silicatos* como: dióxido de silicio (del 65 al 68%) conocido comúnmente como cuarzo, sílice libre conocida como cristobalita (3.5 %), feldspatos, piroxenos, biotita, entre otros y en ocasiones olivino y anfíbol; álcalis como: óxido de potasio y óxido de calcio (del 5 al 6%); metales pesados (en orden decreciente de concentración): zinc, manganeso, plomo, cobre, níquel, cobalto, vanadio, talio, cadmio, selenio, arsénico y antimonio; además de pequeñas cantidades de minerales accesorios; un pH entre 3.99 y 5.84. Además tiene un contenido medio de fósforo de 10 a 20 partes por millón (ppm), de calcio de 1.0 a 2.0 ppm, de magnesio valores que pueden ser mayores a 180 ppm y de azufre, aunque éste varía según la muestra (Martin del Pozzo *et al.*, 2001; Armienta *et al.*, 2002, Narváez *et al.*, 2004, OPS, 2005; Caselli *et al.*, 2011).

En algunas de las erupciones, la ceniza está compuesta de pómez, tanto clara como oscura, que refleja su diferente contenido en sílice y minerales ferromagnesianos. Los silicatos se van liberando con el tiempo; el proceso para que esa capa se integre al suelo y se pueda ver el efecto positivo implica cientos de años (Caselli *et al.*, 2011).

Mediante una lixiviación de las cenizas con agua destilada es posible cuantificar el sulfato, cloruro y fluoruro que se encuentran como recubrimiento de las cenizas (Stoiber *et al.*, 1981).

### 2.4.2. Efectos perjudiciales

#### 2.4.2.1. En la salud

Dependiendo de su composición, la ceniza volcánica puede tener diversos efectos en la salud, como son agravamiento de enfermedades pulmonares y trastornos gastrointestinales por la ingestión de agua o alimentos contaminados con flúor y metales pesados (arsénico, mercurio, etc.) (Gutiérrez *et al.*, 2006). Por otro lado, diversos estudios demuestran que las enfermedades resultantes de la inhalación continua de este polvo fino están relacionadas con alteraciones en el aparato respiratorio y daño en el tejido pulmonar (Rivera *et al.*, 2005), así como la aparición de fluorosis a nivel óseo y dental (enfermedad caracterizada por exceso de flúor en el tejido óseo que lo hace más rígido y quebradizo) (Cronin *et al.*, 2002).

Otra enfermedad asociada con la ceniza volcánica es la silicosis (enfermedad ocasionada por el depósito de sílice en los pulmones). A nivel ocular, además del efecto irritante, los cristales de dióxido de azufre producen abrasiones en la conjuntiva y en la córnea. Por su parte, los microelementos, como el bromo volcánico, pueden formar parte del agua de vertientes y durante la potabilización generar trihalometanos, los cuales son compuestos cancerígenos (Rivera-Tapia *et al.*, 2005).

Un estudio realizado con personas expuestas a las cenizas del volcán Popocatepetl, durante el periodo de Diciembre de 1994 a Enero de 1995, demostró la presencia de alteraciones en la función pulmonar, la proporción fue mayor a la esperada en una población con baja prevalencia de tabaquismo (Rojas *et al.*, 1995; Rojas *et al.*, 1996).

#### **2.4.2.2. En el suelo**

Los componentes de la ceniza volcánica y de las lluvias ácidas pueden quemar la vegetación y el suelo podrá quedar inutilizable por varios meses. Sin embargo, el suelo se enriquece cuando la ceniza reacciona con sus componentes e incrementa su fertilidad para los cultivos subsiguientes.

Además, puede verse afectado por el impacto que las cenizas producen en la calidad del agua como consecuencia de la disminución del pH (por el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico que se generan cuando los elementos se ponen en contacto con el agua) de lagos, ríos y arroyos más allá de los límites aceptables y alterar sus características de sabor, olor, color y turbiedad (OPS, 2005).

#### **2.4.2.3. En la agricultura**

Los efectos sobre la agricultura dependerán del tipo de cultivo, de su grado de desarrollo y evidentemente del espesor de la capa de ceniza caída; se ha observado que puede actuar como insecticida y que en climas cálidos la vegetación se recupera en menor tiempo (Tabla 2) (Gutiérrez *et al.*, 2006, Buteler *et al.*, 2011).

La cantidad de ceniza retenida en la vegetación dependerá de diferentes factores tales como: la superficie de las hojas, densidad del follaje por unidad de área, tamaño, forma y orientación individual de las hojas, características de las hojas (rugosidad, la presencia de fibras, aceites, etc.), tamaño de la ceniza, velocidad y dirección del viento sobre las copas de los árboles, humedad relativa, especialmente si se encuentra sobre 90%; cuando este valor es mayor, la cantidad de ceniza retenida en el follaje es el doble de la que se puede encontrar con menores valores de humedad (Gutiérrez *et al.*, 2006).

La ceniza volcánica es la base para la formación de suelos porosos que permiten retener el agua y el beneficio para las plantas dependerá de la cantidad que caiga y las condiciones del suelo. Si los depósitos de ceniza son de un espesor menor a cinco milímetros y hay viento o lluvias fuertes no causan daños porque el viento se las lleva, se depositan en el suelo y el agua las filtra; en caso contrario si el espesor de ceniza es mayor y hay poca lluvia la ceniza se pega a las hojas causándoles daño. En el caso del suelo, cuando la capa es mayor a los 50 milímetros y sólo llovizna se pueden dañar los pastos (Andrés, 2012).



**Tabla 2.** Efectos de la caída de ceniza volcánica sobre la agricultura

<b>Espesor de la ceniza (mm)</b>	<b>Cultivos</b>
<b>&gt;2000</b>	Toda la vegetación queda destruida
<b>1500</b>	La mayor parte de la vegetación muere
<b>1000</b>	Cientos de cultivos pueden ser parcialmente recuperables
<b>200</b>	Arrozales destruidos
<b>150</b>	Cafetales destruidos
<b>100</b>	Palmas y ramas rotas por el peso de la ceniza
<b>50</b>	Plataneras destruidas
<b>40</b>	50% de pérdidas en legumbres, 15-30% en trigo, verduras, cebada, heno, etc.
<b>30</b>	Los frutos pueden quedar inservibles por la capa de ceniza
<b>25</b>	Daños en cañas de azúcar, papas, etc.
<b>15</b>	Pérdidas de alfalfa y pastos
<b>10</b>	Daños en manzanas, algodón, tabaco, y verduras. De 20 a 40% de la cosecha se daña
<b>&lt;10</b>	Menores daños en pasto, trigo y maíz

(Gutiérrez *et al.*, 2006)

La ceniza que se acumula en los árboles y pastos provoca abrasión por los depósitos de ácido; con la humedad de la lluvia las partículas se adhieren a las hojas impidiendo sus funciones vitales (OPS, 2005). Por lo anterior, es frecuente que ocurra intoxicación o envenenamiento en animales que pastorean en campos donde ha caído ceniza con alto contenido de ácido fluorhídrico (mayores a 250 ppm); como el caso de la erupción del volcán Lonquimay (Chile, 1989) donde se observó casos de osteofluorosis en el ganado del centro de la provincia del Neuquén. La situación más peligrosa para los animales en pastoreo está generalmente a gran distancia del volcán en erupción donde la capa de cenizas y tefra es tan delgada que no se puede diferenciar del pasto. El envenenamiento puede ocurrir en regiones donde se ha depositado sólo 0.5 mm de cenizas.

El viento puede producir alta removilización de la ceniza dando lugar a la formación de dunas que sepultan la vegetación. En zonas productoras de frutales o cultivos que dependen de la floración, por el efecto de los fuertes vientos la ceniza rompe los brotes (Caselli *et al.*, 2001).

## 2.5. Metales pesados

Se definen como metales pesados aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a 5 g/cm<sup>3</sup> cuando están en forma elemental; en la tabla periódica son aquellos que tienen densidades mayores a la del hierro y su número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos); resultan tóxicos para los seres vivos, algunos de ellos incluso en concentraciones muy bajas. Este término es impreciso ya que en realidad cualquier elemento puede resultar tóxico para los seres vivos, sin embargo, se mantendrá el término metal pesado para definir dichos elementos (Navarro *et al.*, 2007). Los ejemplos de metales pesados o algunos metaloides, incluyen el cadmio, cobre, cromo, mercurio, plata, plomo, talio, zinc, entre otros. Junto a ellos hay otros elementos que, aunque son metales ligeros o no metales, se suelen englobar con ellos por orígenes y



comportamientos parecidos, tal es el caso del arsénico, bario, boro y selenio (Spain *et al.*, 2003; Lucho *et al.*, 2005).

Los metales pesados constituyen un grupo de gran importancia y éstos se pueden clasificar en dos grupos: los *oligoelementos* que sirven como micronutrientes (arsénico, boro, cobre, cobalto, cromo, hierro, manganeso, molibdeno, níquel, selenio y zinc), es decir, en pequeñas cantidades, son esenciales para los seres vivos ya que ayudan a realizar funciones enzimáticas y pueden ser absorbidos por las plantas mediante sus raíces o formar parte de la dieta de los animales, pasando cierto umbral resultan tóxicos; los que *no tienen función biológica* conocida (antimonio, bario, berilio, bismuto, cadmio, estaño, mercurio, plomo y talio), aun en bajas concentraciones son perjudiciales para el organismo (Kabata-Pendias, 2001; Spain *et al.*, 2003; García *et al.*, 2005; Long *et al.*, 2007).

La clasificación anterior varía según autores. Cuando se habla de metales pesados no se especifica el estado del elemento puro o la totalidad de sus diversos estados de oxidación ya que no presentan las mismas propiedades físicas, químicas ni tóxicas por lo que sería más conveniente hablar de elementos de tipo metálico que poseen orbitales atómicos profundos ("d" o "f"), posiblemente esta presencia de orbitales profundos es el aspecto clave que les confiere un comportamiento químico análogo en el interior de la célula (Navarro *et al.*, 2007).

Las actividades geológicas naturales son una fuente importante de metales pesados, éstos se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos formando parte de los procesos naturales. Una vez expuestos al medio ambiente no pueden ser degradados fácilmente por lo que se distribuyen en el aire, el agua y el suelo; cuando por motivos naturales o por la acción del hombre se acumulan, se convierten en tóxicos y peligrosos para los seres vivos (Abollino *et al.*, 2002; Diez *et al.*, 2002; Vullo, 2003).

### 2.5.1. Comportamiento en el medio ambiente

El impacto que causan los contaminantes metálicos al ambiente no sólo depende de la capacidad para formar compuestos de coordinación con los componentes del medio y de su respuesta a las condiciones fisicoquímicas y biológicas de su entorno sino que además se debe tener en cuenta que para que ejerzan su toxicidad sobre un ser vivo deben encontrarse disponibles, por ello es importante que al determinar el grado de contaminación por metales pesados se conozca su **biodisponibilidad**, la cual está en función de su movilidad y del potencial que tienen para lixiviarse, esto a su vez depende de la procedencia de los metales (natural o antropogénica) (Prieto *et al.*, 2009). Es importante considerar que la presencia simultánea de los metales pesados puede causar efectos sinérgicos o antagónicos (la toxicidad se reduce al mezclarse). Por lo anterior, es difícil predecir los efectos reales de los contaminantes en el medio (Navarro *et al.*, 2007).

La principal causa del elevado nivel de toxicidad a nivel químico es que tienen gran capacidad para unirse con moléculas orgánicas, forman fácilmente compuestos organometálicos, aumentando su solubilidad, disponibilidad y dispersión (CMAJA, 1999). Estos efectos tóxicos en sistemas biológicos dependen de reacciones con ligandos que tienen gran abundancia en la célula, dichos metales se acumulan en los organismos por lo que en cantidades pequeñas y aparentemente inofensivas absorbidas durante un largo periodo de tiempo llegan a alcanzar

niveles tóxicos, dicho fenómeno se conoce como **bioacumulación** este término se traduce como el aumento en la concentración, en cierto tiempo, de un producto químico (contaminante) en un organismo vivo comparado con la concentración de dicho producto en el ambiente (Vullo, 2003; Navarro *et al.*, 2007; Hernández, 2011). Lo anterior sucede porque el organismo afectado no tiene la capacidad para mantener los niveles necesarios de excreción del contaminante por lo que sufre una retención en su interior, por tal razón algunos metales pesados tienden a bioacumularse en los seres vivos (Angelova *et al.*, 2004; Prieto *et al.*, 2009).

#### **2.5.1.1. En suelos**

El suelo es el principal lugar donde se acumulan los metales pesados, una vez incorporados siguen ciertas pautas generales de movilidad que se pueden clasificar en cuatro vías: *retención en el suelo*, ya sea disueltos o fijados en sitios de intercambio por procesos de adsorción en compuestos inorgánicos o asociados con la materia orgánica, *complejación y precipitación* como sólidos puros o mixtos; *movilización* a las aguas superficiales o subterráneas y *transferencia a la atmósfera* por volatilización y acumulación por las plantas incorporándose a las cadenas tróficas (Pagnanelli *et al.*, 2004; García *et al.*, 2005; Navarro *et al.*, 2007).

La solubilidad, disponibilidad, dispersión y por tanto la toxicidad de los metales dependerá de su reactividad con otros componentes, así como de su grado de labilidad (ligados a materia orgánica, a estructuras minerales o a óxidos de hierro y manganeso), de las características del suelo (pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de intercambio catiónico y/o aniónico, presencia de carbonatos, materia orgánica, entre otras) y de su estado de oxidación. Debido a su solubilidad, la forma iónica (sales), suele ser más tóxica que la forma metálica o elemental (Abollino *et al.*, 2002; Diez *et al.*, 2002; Burt *et al.*, 2003; Spain *et al.*, 2003; Vullo, 2003; Long *et al.*, 2007; Prieto *et al.*, 2009).

La materia orgánica reacciona con los metales formando complejos de cambio (conjunto de partículas con capacidad para adsorber los iones de la solución del suelo) y quelatos. Los metales una vez que forman complejos pueden migrar con mayor facilidad (CMAJA, 1999).

Los metales pesados pueden estar presentes como: iones libres, compuestos de sales metálicas solubles o insolubles o parcialmente solubilizables (como óxidos, carbonatos e hidróxidos) (Vullo, 2003).

Cuando se encuentran como iones libres tienen acción directa sobre los seres vivos, causándoles daños irreversibles ya que bloquean sus actividades biológicas, es decir, inactivan enzimas debido a que forman enlaces con el grupo sulfhidrilo presente en las proteínas, los metales tienen gran afinidad por este grupo y, en menor medida, por los radicales amino, fosfato, carboxilo, imidazol e hidroxilo pertenecientes a enzimas y a otras proteínas esenciales (Deng *et al.*, 1995; Prieto *et al.*, 2009). Por otro lado, los metales pesados tienen una fuerte tendencia para formar complejos organometálicos los cuales son liposolubles y afines a la membrana celular, estos complejos forman sales fácilmente (Acosta, 2007).

Como ya se mencionó, el pH es un parámetro importante, tiene influencia en los procesos de sorción-desorción, precipitación y solución, formación de complejos y reacciones oxido-reducción (Narwal *et al.*, 1999). A partir de este valor se puede inferir la sorción de metales

pesados así como definir su movilidad; a pH moderadamente alto o bien un aumento de pH de la disolución del suelo, por cualquier incidencia, se produce una precipitación de los cationes como hidróxidos o carbonatos de este modo se fijan y quedan retenidos en formas no disponibles para las plantas; en medios muy ácidos pueden pasar nuevamente a la solución en forma de hidroxicomplejos (Palacios *et al.*, 1998; Román *et al.*, 2009). Algunos metales pueden estar en la disolución del suelo como aniones solubles, tal es el caso del selenio (selenato y/o selenito), vanadio (vanadato), arsénico (arseniato y/o arsenito) y cromo (cromatos) (Prieto *et al.*, 2009). Aunque la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido no ocurre lo mismo para el arsénico, cromo, molibdeno y selenio los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino (Kabata-Pendias, 2001).

De acuerdo al valor de pH el suelo se puede clasificar como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Criterios de evaluación de un suelo con respecto al pH

<b>Categoría</b>	<b>Valor de pH</b>
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

(NOM-021-RECNAT-2000)

Así como el pH existen otros parámetros que han demostrado jugar un papel muy importante para la inmovilización de metales pesados presentes en el suelo tal es el caso del porcentaje de arcilla, capacidad de intercambio catiónico y contenido de carbonato activo (Palacios *et al.*, 1998).

Las características del suelo influyen de manera directa y determinante en la concentración de los metales y en los niveles que se encuentran disponibles para las plantas (Rooney *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2006). Los suelos arenosos, debido a su alta porosidad, retienen muy poco a los metales pesados en comparación con los suelos arcillosos estos últimos tienden a adsorber a los metales pesados quedando retenidos en sus posiciones de cambio (Acosta, 2007). Estudios han reportado que el zinc, plomo y níquel se acumulan en suelo de tipo arcilla; y cobre y cadmio en suelo arenoso (Malla *et al.*, 2007).

La irrigación, con el paso del tiempo hace que los metales pesados se acumulen en las capas superficiales del suelo (capa arable) ya que estos elementos lixivian con facilidad, pasando de este modo a la cadena alimenticia en los cultivos de la región presentándose las más altas concentraciones durante periodos recientes de irrigación (Juárez, 2006; Flores *et al.*, 1997; Prieto *et al.*, 2007).

### **2.5.1.2. En plantas**

La vegetación juega un papel importante en el ciclado global de los metales pesados. Debido a que no son degradables fácilmente en forma natural o biológica, los metales pesados pueden ser acumulados en suelos agrícolas y, aunque en el suelo existen ciertos factores que controlan la expresión de su toxicidad, hay cultivos sensibles o que acumulan metales pesados por lo que representa un peligro potencial para las cadenas tróficas y una amenaza para la salud; es importante considerar que algunos contaminantes están más fitodisponibles

que otros (Kabata-Pendias, 2001; Abollino *et al.*, 2002; Diez *et al.*, 2002; Stevens *et al.*, 2003; Lucho *et al.*, 2005; Rooney *et al.*, 2006; Corinne *et al.*, 2007).

La concentración de metales pesados en los vegetales también dependerá del grado de madurez de la planta (Prieto *et al.*, 2007; Mohammad *et al.*, 2011). Se ha demostrado que la concentración total de metales en el suelo no refleja la concentración en los tejidos vegetales y que la fracción biodisponible sí presenta una elevada correlación con la absorción vegetal (Diez *et al.*, 2002).

La absorción de metales pesados a través de las plantas es el primer paso para la entrada de estos contaminantes en la cadena alimenticia tanto la absorción como su consecuente acumulación dependen de su biodisponibilidad en el suelo, de la movilidad de los metales (desde la solución del suelo a la raíz de la planta) esto incluye la composición y propiedades del suelo (pH, contenido de materia orgánica, etc), de la especie del cultivo y de las partes de la planta (Kabata-Pendias, 2001; Juárez, 2006). Algunas plantas acumulan el metal en la pared celular, evitando de esta forma su presencia en el interior y en otros casos los metales pesados son absorbidos en cantidades muy pequeñas aunque su concentración externa sea muy grande (Nñez *et al.*, 2008).

La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales, como el cobre, que pueden quedar en posición no disponible para las plantas, por tal razón algunas plantas en los suelos ricos en materia orgánica carecen de ciertos elementos (CMAJA, 1999).

Las interacciones suelo-planta y raíz -microorganismos también juegan un papel importante en la regulación del movimiento de metales pesados del suelo a las partes comestibles de los cultivos (Long *et al.*, 2007); los microorganismos se adaptan y toleran la presencia de metales, incluso los pueden ocupar para crecer pero a altas concentraciones también les resultan tóxicos (Spain *et al.*, 2003).

### **2.5.2. Toxicología de metales pesados y otros elementos**

Los incrementos en las concentraciones de metales pesados en el suelo debido a su acumulación así como su biodisponibilidad causan daños no sólo a las plantas sino que además representan un riesgo para la salud humana (Acosta, 2007; Prieto *et al.*, 2009).

En el humano las tres principales vías de entrada de los metales pesados al cuerpo son: *la inhalatoria*, ya sea en forma de partículas (gas o vapor), en forma elemental o como combinaciones inorgánicas u orgánicas; *la dérmica*, a través de la piel y *la oral*, cuando se ingieren bebidas o alimentos contaminados, ésta última es la principal vía de exposición (Long *et al.*, 2007).

Los metales pesados dentro del cuerpo humano, así como en las plantas, tienden a combinarse con las enzimas y a inhibir su funcionamiento. El contenido excesivo de estos metales en los alimentos se asocia con numerosos y graves trastornos, principalmente enfermedades cardiovasculares, renales, nerviosas y en los huesos ya que se acumulan en los órganos vitales del cuerpo como riñones, huesos e hígado. Dosis muy pequeñas producen consecuencias fisiológicas o neuronales graves. (Nebel *et al.*, 1999; Vinasco, 2011).

De acuerdo a los efectos que pueden causar se pueden dividir en dos grupos: agudos y crónicos; los efectos agudos ocurren dentro de unas horas o días posteriores al momento en que la persona consume un contaminante, la mayoría de las personas pueden combatir éstos de la misma forma que combaten los gérmenes, dichos contaminantes no tienen efectos permanentes; los efectos crónicos ocurren después de que las personas consumen durante muchos años un contaminante que rebasa los niveles establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).

#### **2.5.2.1. Cadmio (Cd)**

El cadmio no tiene función biológica conocida, la principal fuente de exposición se encuentra en los alimentos; en el ambiente, es peligroso porque muchas plantas y algunos animales lo absorben y lo concentran dentro de sus tejidos, aunque las plantas presentan amplia gama de tolerancia a las concentraciones del suelo por lo que se vuelven inseguras para el consumo en humanos y animales (Acosta, 2007; Prieto *et al.*, 2007).

Su abundancia promedio en la corteza terrestre es de 0.16 ppm, en suelos de 0.1 a 0.5 ppm, en ríos de 1 µg/L y en aguas subterráneas de 1 a 10 µg/L. Se encuentra en minerales que también contienen zinc, plomo o cobre. El cadmio es considerado como altamente tóxico (Vinasco, 2011).

El cadmio ha sido asociado con la aparición de cáncer en animales de experimentación, así como con casos de cáncer de próstata en humanos (INECC, 2009).

En el ser humano, una vez absorbido, se combina con la proteína metalotioneína y se acumula en los riñones, el hígado y los órganos reproductores, la absorción pulmonar es mayor a la intestinal por lo que el riesgo es mayor cuando el cadmio es aspirado (Hernández, 2011). La concentración crítica en la corteza renal que da lugar a una prevalencia de 10% de proteinuria (presencia de proteína en la orina) es aproximadamente de 200 ppm y se alcanza con una ingesta diaria de unos 175 µg por persona durante 50 años (INECC, 2009).

Partiendo de una tasa de absorción de cadmio vía alimentaria de 5% y de una tasa diaria de excreción de 0.005% de la carga corporal, se estableció un nivel de ingestión semanal tolerable provisional de 7 µg/Kg (INECC, 2009).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) recomienda un nivel máximo de cadmio en aguas de irrigación de 10 µg/L. El límite máximo permisible según la EPA para agua potable es 10 µg/L (Vinasco, 2011).

#### **2.5.2.2. Cobre (Cu)**

Es un elemento necesario para el crecimiento de animales y plantas (en muy bajas concentraciones). Es esencial para todos los organismos, actúa sobre enzimas redox y el transporte de oxígeno. El exceso de cobre puede producir deficiencia de zinc y viceversa, así como de hierro y fósforo. (Acosta, 2007).

Su abundancia promedio en la corteza terrestre es de 45 a 50 partes por millón (ppm). En los suelos naturales los valores más frecuentes son de 10 a 30 ppm, los niveles de referencia se sitúan entre 17 y 100 ppm, para los suelos agrícolas el umbral es de 100 a 200 ppm (Alloway, 1995; Baize, 1997; CMAJA, 1999).

En los suelos lo podemos encontrar: como iones solubles, complejos inorgánicos u orgánicos solubles formando complejos orgánicos estables; adsorbidos por los óxidos de manganeso, hierro y aluminio o por la materia orgánica y las arcillas, o formando parte de las estructuras de los minerales (Alloway, 1995).

El cobre es muy poco sensible a los cambios de pH, se encuentra fuertemente fijado en los suelos por lo tanto es un metal muy poco móvil. La materia orgánica y los óxidos de hierro y manganeso son los parámetros más importantes para la adsorción del cobre. Los ácidos húmicos y fúlvicos presentes en el suelo se unen fuertemente al  $\text{Cu}^{2+}$  formando quelatos solubles. Las formas asimilables por las plantas se encuentran como  $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O}_6)]^{2+}$  para los suelos ácidos y como  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  para los suelos alcalinos y neutros (Alloway, 1995; Prueb, 1997).

En el suelo, su solubilidad aumenta con la presencia de óxidos de hierro amorfo ( $\text{FeO}$ ) y disminuye al aumentar el contenido de carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ) (Diez, 2006).

Las plantas acumulan al cobre preferentemente como  $\text{Cu}^{2+}$  de la solución del suelo; sin embargo, existen evidencias que cuando este catión no se encuentra disponible algunas especies lo absorben en forma de complejos orgánicos de bajo peso molecular. La absorción dependerá del tamaño, de la solubilidad y de la estabilidad del complejo orgánico (Kabata-Pendias 2001; Siebe, 1994).

### **2.5.2.3. Cromo (Cr)**

Se encuentra principalmente como mineral en forma de cromo-hierro. Es considerado no esencial para las plantas pero un elemento traza esencial para algunos animales (Vinasco, 2011).

Su abundancia promedio en la corteza terrestre es de 100 ppm. En los suelos, los valores más frecuentes están entre 20 y 80 ppm, los contenidos pueden variar ya que están en función del material original del que proceda el suelo (Alloway, 1995).

El cromo puede presentarse bajo diferentes estados de oxidación ( $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{6+}$ ) siendo el  $\text{Cr}^{3+}$  el más estable, en esta forma es poco tóxico y relativamente inmóvil, mientras que el  $\text{Cr}^{6+}$  es muy tóxico y se mueve con facilidad de los suelos porosos con pH moderado a alto, éste se encuentra en los cultivos y como elemento remanente en los suelos agrícolas (Alloway, 1995); el  $\text{Cr}^{4+}$  existe como anión, y es un oxidante fuerte, con una marcada tendencia a reducirse en presencia de materia orgánica y de óxidos de manganeso (Bohn *et al.*, 1985). Las formas biodisponibles disminuyen al incrementarse el contenido de hierro (Diez, 2006).

En los suelos, la movilidad del cromo aumenta al disminuir el pH, aunque es mucho menos sensible a las variaciones del pH que el plomo, zinc, cadmio y cobalto. Al incrementar el contenido de carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ) disminuye su solubilidad (Prueb, 1997; Diez, 2006).

En cuanto a los métodos de eliminación del cromo del agua, la EPA ha aprobado la coagulación-filtración, el intercambio iónico, la ósmosis inversa y el ablandamiento con cal (ASTRE, 2008).

Los efectos potenciales del cromo sobre la salud dependen de diversos factores tales como la forma química en que se presente, la concentración, el tiempo de exposición y la forma de

incorporación del cromo al organismo (ingestión, inhalación o absorción a través de la piel) (Vinasco, 2011).

En el ser humano, el  $\text{Cr}^{3+}$  es necesario para el metabolismo de los azúcares y para muchas reacciones enzimáticas, es un ingrediente muy común en muchos suplementos vitamínicos y minerales. El problema de salud más común en el ser humano por exposición al cromo involucra principalmente a las vías respiratorias. Estos efectos incluyen irritación del revestimiento del interior de la nariz, secreción nasal y problemas para respirar. Está asociado con la ingestión de agua contaminada con cromo hexavalente (ASTRE, 2008; Hernández, 2011).

Existen evidencias de que el cromo hexavalente daña el ADN e induce mutaciones genéticas; los riesgos potenciales del cromo hexavalente en la actividad industrial han sido ampliamente documentados. Muchos estudios han revelado altas tasas de cáncer de pulmón en operarios expuestos a la inhalación del mismo, así como un incremento de la tasa de cáncer del tracto gastrointestinal. Hasta el momento, la evidencia científica indica que el cromo hexavalente es probablemente mucho más tóxico por inhalación que por ingestión (Vinasco, 2011).

Si bien la forma trivalente presenta muy baja toxicidad la EPA ha determinado que el cromo hexavalente es un metal cancerígeno así como otros compuestos de cromo (Vinasco, 2011).

Se ha establecido que el agua potable no debe contener más de 50  $\mu\text{g}/\text{L}$  aunque no se han identificado los efectos a largo plazo sobre la salud por el consumo de agua con contenidos de cromo que superan dicho valor. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura recomienda un nivel máximo para aguas de irrigación de 100  $\mu\text{g}/\text{L}$ . El Nivel Máximo de Contaminante estándar según la EPA para agua potable es 100  $\mu\text{g}/\text{L}$  para cromo total. El gobierno federal recomienda una ingesta diaria de 50 a 200  $\mu\text{g}$  de cromo para una persona adulta (Vinasco, 2011).

#### **2.5.2.4. Níquel (Ni)**

Es considerado un elemento esencial para el metabolismo de las plantas, siendo un elemento móvil en sus tejidos, resulta ligeramente tóxico, se acumula principalmente en las hojas y en las semillas (Corinne *et al.*, 2007).

Su abundancia promedio en la corteza terrestre es de 80 ppm, en las rocas su contenido depende de la naturaleza de las mismas, puede ir desde 0.5 hasta 2000 ppm y para suelos agrícolas desde 70 hasta 210 ppm (Alloway, 1995; CMAJA, 1999).

En la capa arable del suelo el níquel aparece ligado a formas orgánicas o formando quelatos fácilmente solubles (Corinne *et al.*, 2006). Así como el cromo, la solubilidad del níquel aumenta con la presencia de óxidos hierro amorfo ( $\text{FeO}$ ) y disminuye al aumentar el contenido de carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ) (Diez, 2006).

Su biodisponibilidad dependerá del pH, del contenido de materia orgánica y de óxidos-hidróxidos (Prieto *et al.*, 2009). El contenido de níquel disponible aumenta de forma proporcional con el incremento de éste en el medio y su disponibilidad disminuye con el tiempo. Esto indica que el níquel es fijado en formas no disponibles en el suelo y además no fácilmente intercambiables (Palacios *et al.*, 1998).

La adsorción de metales en el suelo afecta su comportamiento y su biodisponibilidad. Este proceso controla la concentración de los iones metálicos y complejos en la solución del suelo y por lo tanto tienen gran influencia en su absorción por las raíces de las plantas. A pH alcalino se favorece la adsorción de níquel, por lo tanto hay una menor fitodisponibilidad mientras que los suelos con pH ácido adsorben menos níquel quedando en solución como  $\text{Ni}^{2+}$  lo que permite mayor disponibilidad para las plantas, éstas requieren menos de 0.001 ppm (Ramachandran *et al.*, 2013).

#### **2.5.2.5. Plomo (Pb)**

Se trata de un metal pesado potencialmente nocivo, neurotóxico carente de acciones benéficas para los organismos. En diferentes grados de acumulación, puede causar diversos daños en las plantas así como en el ser humano (Kabata-Pendias, 2001).

Su abundancia promedio en la corteza terrestre es de 13 partes por millón (ppm), en rocas de 1 a 20 ppm, en aguas subterráneas <0.1 ppm y en suelos se encuentran en amplios rangos (2 a 16000 ppm) siendo de 10 a 50 ppm los valores más normales (CMAJA, 1999; Vinasco, 2011).

Se presenta en suelos bajo las formas de  $\text{Pb}^{2+}$  y  $\text{Pb}^{4+}$  (especialmente  $\text{Pb}^{2+}$ ); lixivian en fracciones solubles en agua y/o intercambiables lo cual constituye un peligro potencial por la posible bioacumulación en cultivos (Prieto *et al.*, 2007).

La disponibilidad de plomo para las plantas está fuertemente condicionada por el pH del suelo, al disminuir el pH la disponibilidad aumenta, siendo especialmente móvil a pH extremadamente ácido, a pH alcalino forma complejos estables con la materia orgánica, aun a pH neutro puede ser utilizado y acumulado por las plantas (Prueb, 1997; Prieto *et al.*, 2007). Dentro de las especies con alto porcentaje de solubilidad se encuentran los quelatos de plomo. Tienen una fuerte tendencia a unirse a los fosfatos para formar compuestos insolubles. Los compuestos de hierro, manganeso y aluminio presentan una fuerte capacidad para adsorber plomo (Alloway, 1995).

El plomo presente en suelos contaminados puede llegar a inhibirse mediante la aplicación de fósforo y óxidos de magnesio; sin embargo, estos tratamientos pueden llegar a afectar la biodisponibilidad de otros metales esenciales como zinc (Prieto *et al.*, 2009).

En algunas plantas el plomo es capaz de acumularse principalmente en las raíces y en menor medida en otras partes u órganos de los cultivos. Algunos autores han reportado trazas de este elemento en granos de cebada (Kabata-Pendias, 2001; López *et al.*, 2005). Cuando este metal alcanza niveles tóxicos, provoca la disminución de la fotosíntesis, se le atribuye la reducción en el crecimiento, en la biomasa y en la transpiración, además de lesiones cromosómicas, inhibición de la división celular e interferencia con enzimas ligadas al metabolismo del nitrógeno (INECC, 2009).

En el ser humano el plomo puede tener una amplia variedad de efectos biológicos según el nivel y la duración de exposición; se han observado efectos en el funcionamiento general del organismo. Los animales pueden absorber plomo por inhalación o ingestión. Debido a que la absorción de plomo en el organismo es lenta su excreción lo es aún más por lo que tiende a acumularse (Prieto *et al.*, 2009).



Existen dos tipos de intoxicación, la aguda y la crónica, en el primer caso se presenta acompañada de alteraciones digestivas, dolores epigástricos y abdominales, vómitos, alteraciones renales y hepáticas, convulsión y coma; para el segundo caso, la enfermedad se conoce como saturnismo, su principal evidencia es la anemia, ya que el plomo inhibe enzimas (delta aminolevulínico deshidratasa) involucradas en la síntesis del grupo hemo de la hemoglobina alterando el transporte de oxígeno en la sangre, además de presentarse síntomas como debilidad, dolor muscular, fatiga, cefalea, alteraciones renales; entre otras consecuencias más graves está la degeneración del tejido en el sistema nervioso central (INECC, 2009; Hernández 2011; Vinasco, 2011).

La intoxicación en adultos ocurre a concentraciones superiores a los 80 µg/100 mL y según la EPA para agua potable es de 15 µg/L (INECC, 2009; Vinasco, 2011).

#### **2.5.2.6. Boro (B)**

Es un elemento que se encuentra de forma natural en el ambiente, se clasifica como metaloide. Constituye el 0.001% en la corteza terrestre, nunca se ha encontrado libre. Está presente en el agua de mar y agua subterránea (en partes por millón) y en pequeñas cantidades en la mayoría de los suelos (ASTRE, 1995; Lenntech, 2013).

A menudo se encuentra combinado con otras sustancias formando compuestos llamados boratos, algunos boratos comunes incluyen al ácido bórico, sales de boratos y óxido de boro (ASTRE, 1995).

Es liberado al aire, suelo y agua a través de los procesos de erosión, siendo los depósitos minerales (los de origen volcánico) los lugares más importantes en donde se encuentran altas concentraciones de boro.

La presencia de boro en cantidades muy pequeñas es necesaria en casi todas las plantas pero en grandes concentraciones resulta tóxico; las plantas lo absorben del suelo y a través del consumo de plantas por los animales éste termina en la cadena alimentaria.

En el ser humano, su principal fuente de exposición es mediante frutas y vegetales, y en menor medida, a través del agua y del aire. Si la exposición es breve en grandes cantidades de boro, como en alimentos contaminados, puede causar problemas de salud dañando el estómago, hígado, riñones y cerebro incluso puede causar la muerte; si la exposición es en pequeñas cantidades puede llegar a irritar la nariz, garganta y ojos (Lenntech, 2013).

Los animales no acumulan boro en su organismo; sin embargo, estudios indican que puede causarles daños a través de la comida o el agua ya que si absorben grandes cantidades de boro durante periodos breves o prolongados dañan los órganos reproductivos masculinos, así mismo cuando los animales son expuestos al boro durante el embarazo sus descendientes pueden sufrir defectos de nacimiento. Las dosis que producen estos efectos en animales son más de 1,800 veces más altas que las que ingieren diariamente adultos de la población general en los E.U.A. (ASTRE, 1995; Lenntech, 2013).

El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS), la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la EPA no han clasificado al boro en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos.

La EPA ha determinado que es improbable que la exposición a concentraciones de boro de 4 mg/L durante 1 día ó 0.9 mg/L durante 10 días cause efectos adversos en niños, así como también ha determinado que es improbable que la exposición de por vida a 1 mg/L de boro en el agua potable cause efectos adversos.

La Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) ha establecido un límite promedio de 15 mg/m<sup>3</sup> para óxido de boro en el aire durante una jornada diaria de 8 horas, 40 horas semanales (ASTRE, 1995).

#### **2.5.2.7. Flúor (F)**

El flúor se encuentra en su mayoría en forma de fluoruros los cuales son definidos como compuestos binarios o sales de flúor y otro elemento. Forman parte de las rocas del suelo, del carbón y de la arcilla en la corteza terrestre. La fuente natural de ácido fluorhídrico y de otros fluoruros que se liberan al aire son las erupciones volcánicas.

El promedio de los niveles de fluoruros en aguas superficiales es cerca de 0.2 partes por millón (ppm), en agua de manantial varían de 0.02 hasta 1.5 ppm, en suelos se encuentra entre 200 y 300 ppm, los niveles pueden ser más altos en áreas con yacimientos minerales que contienen fluoruros así como en áreas donde se usan abonos con fosfatos.

Los fluoruros que se liberan a la atmósfera desde volcanes, plantas de energía y otros procesos de alta temperatura generalmente lo hacen como ácido fluorhídrico cuando éste se encuentra como gas es absorbido por la lluvia, las nubes y la niebla ácida para formar ácido fluorhídrico líquido y caer a la tierra con la precipitación, también puede quedar adherido a partículas muy pequeñas las cuales pueden permanecer en el aire durante muchos días. Por otro lado se encuentran los fluoruros que se liberan al aire, éstos se depositan en el suelo o en el agua, se asocian con varios elementos (con aluminio en agua dulce y con calcio y magnesio en agua de mar) y se adhieren fuertemente a partículas presentes en los componentes del suelo o del agua; los que se encuentran en el polvo que sopla el viento son generalmente partículas más grandes, éstas caen al suelo por la gravedad o son removidas del aire por la lluvia. El movimiento del agua a través del suelo remueve solamente una pequeña cantidad de fluoruros del suelo.

Los fluoruros pueden ser incorporados y acumulados por las plantas o pueden depositarse en forma de polvo en las partes altas de las plantas. La cantidad de fluoruro incorporado por las plantas depende del tipo de planta, la naturaleza del suelo, y de la cantidad y la forma de fluoruro en el suelo. Se sabe que las plantas de té acumulan fluoruro en las hojas. Los animales que comen plantas que contienen fluoruro pueden acumular fluoruro.

Los fluoruros se encuentran en los alimentos en niveles generalmente bajos pero aquellos que son cultivados en áreas donde los suelos tienen cantidades altas de fluoruros o donde se usaron abonos con fosfatos pueden tener niveles más altos (ASTRE, 1995).

El exceso de flúor es reconocido como el más peligroso entre los lixiviados en el suministro de agua pero pocas erupciones históricas han generado intoxicación por flúor en los seres humanos; no es común que alcancen concentraciones que estén por encima de varios miles de partes por millón (Stoiber *et al.*, 1990).

La concentración de fluoruros en los lixiviados de ceniza es un buen indicador de los niveles disponibles para que la vegetación lo tome de la ceniza volcánica. El exceso de flúor en los

vegetales causa necrosis foliar (puntos marrón en las hojas) y deformación de las frutas. El fluoruro puede afectar a las plantas ya sea por las emisiones gaseosas de ácido fluorhídrico o por la absorción desde la raíz en suelos enriquecidos con fluoruro, ésta última es mucho menos significativa que la de fluoruro en el aire (Armienta *et al.*, 2011).

El ser humano se expone a estos fluoruros cuando respira aire que contiene ácido fluorhídrico o polvos de fluoruro, estas sustancias pasan rápidamente a través de los pulmones a la corriente sanguínea. Otra forma de exponerse es a través del contacto con la piel, la mayor parte pasa rápidamente a la sangre esto dependerá de la concentración del ácido fluorhídrico y del tiempo que permanece en la piel, casi todo el fluoruro que entra al cuerpo de esta manera es eliminado rápidamente del cuerpo en la orina, aunque cierta cantidad es almacenada en los huesos y los dientes (ASTRE,1995). En la Tabla 4 se muestran los efectos sobre la salud por ingestión de fluoruro en agua potable.

**Tabla 4.** Efectos sobre la salud por ingestión de fluoruro en agua potable

<b>Concentración (mg/L)</b>	<b>Efectos sobre la salud</b>
1 – 4.1	Fluorosis dental
8	Osteosclerosis (en rayos X)
>10	Fluorosis en esqueleto

*(Caselli et al., 2011)*

El fluoruro de sodio, el fluoruro de hidrógeno y el flúor han sido clasificados como sustancias peligrosas por la EPA la cual establece que la cantidad máxima de fluoruro permitida en agua potable es de 4.0 mg/L (ASTRE, 1995). La OSHA ha establecido un límite de 0.2 mg/ m<sup>3</sup> para flúor, 2.0 mg/m<sup>3</sup> para ácido fluorhídrico y 2.5 mg/m<sup>3</sup> para fluoruro durante una jornada diaria de 8 horas. (ASTRE, 1995).

La ingesta diaria promedio de fluoruro para adultos a través de los alimentos y el agua va desde 1 mg hasta 2.7 mg estos niveles dependen del contenido de fluoruro que haya en el agua que consumen (ASTRE, 1995).

#### **2.5.2.8. Silicio(Si)**

El silicio elemental tiene las propiedades físicas de los metaloides; sin embargo, en su comportamiento químico se parece a los metales.

Por su abundancia, con excepción del oxígeno, el silicio excede en mucho a cualquier otro elemento, constituye el 27.72% de la corteza sólida de la Tierra.

El silicio forma compuestos con 64 de los 96 elementos estables y probablemente forme siliciuros con otros 18 elementos, además forma compuestos importantes y de empleo frecuente con hidrógeno, carbono, halógenos (algunos de los cuales contienen enlaces silicio-silicio), nitrógeno, oxígeno y azufre. Se encuentra en muchas formas de dióxidos y en innumerables variaciones de los silicatos naturales (ASTRE, 1995).

En la naturaleza, excepto las formas inertes-cristalinas e insolubles del silicio, se encuentran formas activas de silicio, que con la acción de agentes como temperatura, lluvia y CO<sub>2</sub> disuelto en el agua (en forma de ácido carbónico), actúan sobre minerales arcillosos y liberan el ácido silícico a una concentración de 1 a 50 ppm, al mismo tiempo liberan minerales, formándose silicatos de calcio, magnesio, potasio, zinc, hierro incrementando la capacidad de intercambio

catiónico de los suelos y el pH del suelo se vuelve alcalino (7.5 a 8.5). En estos suelos se encuentran de 100 a 200 ppm de estas formas solubles de silicio.

Conforme el pH aumenta, el contenido de silicio se incrementa y la concentración de fósforo y hierro disminuye, esto se debe a que el ácido silícico solubiliza al fósforo y al hierro induciendo su aprovechamiento para los cultivos. Estas variaciones en la concentración del silicio también tienen efectos sobre diferentes procesos del suelo y el crecimiento de microorganismos y plantas. Las raíces aparentemente liberan enzimas y compuestos orgánicos los cuales solubilizan al silicio presente en las arcillas que provienen de las rocas y minerales.

El silicio juega un papel importante en la planta, este elemento controla su desarrollo, la asimilación y distribución de nutrientes minerales, incrementa su resistencia a las variaciones de temperatura, a la alta concentración de sales y metales pesados, a hidrocarburos, a insectos, a hongos y a enfermedades (Quero, 2008).

El silicio elemental es inerte y parece no causar daños a la salud; sin embargo, el silicio cristalino (dióxido de silicio) el cual se encuentra como polvo de silicio representa un potente peligro y aunque la probabilidad de que se produzca en los procesos normales es baja éste puede tener efectos crónicos en el sistema respiratorio, por contacto irrita la piel y los ojos, su inhalación causa irritación de los pulmones y de la membrana mucosa. Se han documentado lesiones pulmonares leves en animales de laboratorio sometidos a inyecciones de dicho polvo.

El dióxido de silicio al depositarse en los pulmones origina una enfermedad llamada silicosis, el daño dependerá del tiempo de exposición por lo que puede clasificarse de la siguiente manera: *silicosis crónica simple*, es la forma más común, resulta de la exposición a largo plazo (más de 20 años) a bajas cantidades de polvo de sílice, causa inflamación en los pulmones y en los ganglios linfáticos del tórax ocasionando dificultad para respirar; *silicosis acelerada*, se presenta después de la exposición a cantidades mayores de sílice en un periodo más corto (5-15 años), inflamación en los pulmones y los síntomas ocurren más rápidamente que en la silicosis simple; *silicosis aguda*, resulta de la exposición a cantidades muy grandes de sílice durante corto tiempo, los pulmones se inflaman y se pueden llenar de líquido causando dificultad respiratoria y bajos niveles de oxígeno en la sangre. Se puede presentar fibrosis masiva y progresiva en la silicosis simple o acelerada, siendo más común en la forma acelerada, dicha fibrosis causa cicatrización grave y destruye estructuras pulmonares normales.

Estudios realizados indican que el cáncer de pulmón, bronquitis y enfermedades renales están asociadas con exposiciones a silicio cristalino (especialmente cuarzo y cristobalita) en lugares de trabajo, mostrando una relación directa en exposición-respuesta.

La Dosis Letal Media<sup>1</sup> oral es de 3160 mg/kg (ASTRE, 1995).

---

<sup>1</sup> DL<sub>50</sub>. Dosis individual de una sustancia que provoca la muerte del 50% de la población animal debido a la exposición a la sustancia por cualquier vía distinta a la inhalación. Expresada como miligramos o gramos de material por kilogramo de peso del animal.)

### 2.5.3. Normatividad

Debido a los daños que pueden causar los metales pesados en el ser humano se revisaron Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Normas Mexicanas (NMX) con el objetivo de encontrar los Límites Máximos Permisibles (LMP) en los alimentos estudiados en el presente proyecto, en caso de exceder estos límites puede haber daños al ser humano y al medio ambiente.

Se revisó la *NOM-117-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica*, así como también la norma de durazno (NMX-FF-060-SCFI-2009), guayaba (NMX-FF-040-1993), rábano (NMX-FF-053-1982) y cebolla (NMX-FF-021-SCFI-2003), en ninguna se mencionan LMP para metales pesados.

Por lo anterior se buscaron los límites que establece la Unión Europea y se encontró que para frutas y hortalizas, en peso fresco, el límite para cadmio y plomo es de 0.05 ppm y 0.10 ppm respectivamente; en rábano, en peso fresco, para plomo es de 0.10 ppm. Por otro lado se encontraron los LMP establecidos por la FAO para elementos como cadmio, cobre, cromo, níquel y plomo los cuales indican que en vegetales, en peso seco, los límites son de 0.2 ppm, 40 ppm, 40 ppm, 2.3 ppm y 0.3 ppm respectivamente (Kihampa *et al*, 2011).

Para el caso de los suelos, se encontró la *NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio* la cual establece que los límites en suelo de uso agrícola para cadmio, cromo hexavalente, níquel y plomo son 37 ppm, 280 ppm, 1600 ppm y 400 ppm respectivamente.

### **3. Antecedentes**

#### **3.1. Volcanes que han causado daños al sector agropecuario**

Varios países en América presentan actividad volcánica, como consecuencia de este fenómeno surgen problemas en los diferentes sectores productivos.

En esta sección se mencionan sólo algunos volcanes que tras su erupción han causado daños en el sector agropecuario.

##### **3.1.1. Volcán Chichonal, Chiapas**

El volcán Chichonal es uno de los 14 volcanes considerados activos en México. En Marzo de 1982 este volcán presentó actividad con erupciones explosivas, abundante lluvia de cenizas y flujos piroclásticos causando daños a tierras cultivables, ganado y desafortunadamente se registraron pérdidas humanas y miles de damnificados (Guevara *et al.*, 2002).

Como consecuencia de la erupción, en un radio de 10 Kilómetros, hubo daños tales como la desaparición completa de flora y fauna, pérdida de cultivos, cambios en la topografía, condición y azolve de los ríos, desaparición de la fauna acuática y cambio en el curso de los ríos (Ramos, 2002). Dejó ocho poblaciones totalmente destruidas, más de 2000 víctimas y más de 20 000 damnificados, 51 poblados y rancherías resultaron severamente afectados, con enormes pérdidas en tierras cultivables, ganado, plantaciones de cacao, café y plátano en un radio de 50 kilómetros (Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.2012-2018. Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático).

En Mayo de 1982, a pocas semanas de las fuertes erupciones del Volcán Chichonal, la Facultad de Minas de la Universidad de Guanajuato y el Instituto de Geología de la UNAM indicaron que la erupción produjo, a los 40 minutos de iniciada, una columna de piroclásticos y gases de 16.8 kilómetros de altura (estratósfera) y de casi 100 kilómetros de diámetro; una lluvia de fragmentos piroclásticos se prolongó por varias horas en toda la región, poniendo fuera de servicio carreteras y aeropuertos cercanos y matando gran cantidad de animales domésticos y ganado (Sánchez-Rubio, 1985).

##### **3.1.2. Volcán Puyehue, Chile**

Al momento de la cosecha, los frutos presentaban una importante acumulación de material en su superficie, producto de la influencia de la nube volcánica sobre la región durante los meses después de la erupción del Puyehue. Su efecto en la aparición de daños se debió a un aumento significativo en la cantidad de partículas y otros materiales adheridos sobre la superficie de los frutos, muy superior a lo habitual. Las características morfológicas y de dureza de las cenizas determinan que se comporten como un material altamente abrasivo (Gomila *et al.*, 2012).

### **3.1.3. Volcán Popocatepetl**

El 25 de Mayo del 2012 se reportó que San Pedro Benito Juárez (en Atlixco, Puebla), por su cercanía con el volcán Popocatepetl, fue la zona más afectada. Campesinos de la zona reportaron pérdidas de hasta un 80 por ciento en maíz y frijol pero sobretodo en árboles frutales que la ceniza volcánica secó y picó los duraznos evitando su maduración así como también reportaron daños en cultivos de pera y aguacate (Ayala, Y. Televisa Puebla. 2012).

### **3.1.4. Volcán Nevado del Ruiz, Colombia**

Con la erupción del 29 de Mayo del 2012 del Nevado de Ruíz se reportaron casos de sectores productivos dañados, incluso un mes después de haber ocurrido tal fenómeno seguían reportándose nuevos casos.

En esa ocasión se trató de la producción de cítricos y plátano en diversos puntos del municipio de Palestina (Caldas). Días después de esa primera fuerte lluvia de ceniza, se empezaron a observar manchas en la cáscara de naranjas, mandarinas y limones, como efecto de este fenómeno la cáscara de la fruta se rompe. Hubo pérdidas por la calidad de la fruta.

Otro de los perjuicios de la caída de este material volcánico es la afectación del proceso reproductivo en estos cultivos. Debido a que la ceniza volcánica es abrasiva y corrosiva puede afectar los órganos reproductivos de la flor o puede evitar que germine la flor. Además es posible que se afecten los procesos de polinización que realizan el viento y los insectos (La patria, 2012).

### **3.1.5. Volcán Tungurahua, Ecuador**

Este volcán se considera activo, ha hecho erupción periódicamente desde 1999.

A partir de la reactivación de dicho volcán (Mayo del 2010) en los cantones de Mocha, Patate, Quero y Tisaleo, de acuerdo con el Ministerio de Inclusión Económica y Social (MIES) de Ambato, se reportaron alrededor de 29 277 hectáreas, dentro de las cuales 10 672 hectáreas de cultivos, 9538 hectáreas de pastos y 9067 hectáreas de huertos, fueron afectadas por la caída de ceniza volcánica <<http://www.hoy.com.ec/noticias-ecuador/ceniza-dana-19-mil-ha-de-cultivos-en-cuatro-zonas-412997.html>>

Otra erupción ocurrida fue el 20 de Abril del 2011, dejando tras su paso suelos agrícolas cubiertos de ceniza acabando con los cultivos de la región lo que se resumió en pérdidas para los productores; no se dispone de datos del alcance total de los daños en la región (Panamá América. Crítica, 2013).

Nuevamente en Diciembre del 2012 se reportó un incremento en la actividad del volcán, los agricultores de los cantones Baños, Quero y Pelileo en la provincia de Tungurahua; y de Penipe y Guano en la provincia de Chimborazo, fueron los más afectados. Según los técnicos del Ministerio de Agricultura Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), aproximadamente 250 hectáreas fueron afectadas; 190 cabezas de ganado no tenían pastos limpios; cultivos de papa, maíz y tomate de árbol se encontraban cubiertos de ceniza volcánica, por otro lado también se indicó que las hortalizas y pastizales fueron los más afectados ( Figura 6) (Fabián Maisanche. Diario El comercio, 2013)



**Figura 6.** Daños en cultivos por erupción del volcán Tungurahua (Maisanche, 2013).

En Agosto de 2012 las localidades y zonas agrícolas ubicadas al occidente del volcán Tungurahua sufrieron nuevamente las consecuencias de la caída de ceniza, pues según una evaluación preliminar del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), más de 6.200 hectáreas de cultivos se vieron afectadas y al menos 10.000 cabezas de ganado se quedaron sin comida. Cultivos como cebolla blanca, zanahoria amarilla, papa, pasto y avena quedaron bajo la ceniza; los agricultores recuperaron parte de la cebolla.

La mayor afectación se presentó en el pasto (4.500 hectáreas) y cultivos de papa (1.400 hectáreas), maíz (300 hectáreas) y haba (20 hectáreas), principalmente en la parte alta del cantón Quero y en la parroquia Cotaló, de Pelileo.

<<http://solnacimiento.blogspot.mx/2012/08/ceniza-del-volcan-tungurahua-sigue.html>>

### **3.1.6. Volcán Santiaguito, Guatemala**

El volcán Santiaguito se encuentra en Quetzaltenango, Guatemala. Su actividad volcánica es constante, a tal grado que se dificulta la medición de su altura exacta por los constantes cambios en su estructura.

Se estima que 20 mil personas de nueve comunidades que habitan en las faldas del área sur del volcán Santiaguito han resultado afectadas por las explosiones de ceniza de dicho volcán. En esas áreas existen grandes extensiones de cultivos de caña y café, así como maíz y frijol de subsistencia familiar, los cuales también resultaron afectados. (González, B. Siglo 21, 2013).

### **3.1.7. Volcán Pacaya, Guatemala**

Desde el Siglo XVI, se han registrado muchas erupciones del Volcán de Pacaya en forma intermitente, distinguiéndose varios ciclos de actividad, alternados con períodos de baja actividad o de quietud (INSVMH, 2012).

En la erupción de 1998 se depositó una capa de ceniza de 2.5 centímetros de espesor dañando cultivos de café, maíz, frijol y pasto para el ganado; nuevamente en el año 2000 se reportaron daños en cultivos de café y pastizales ya que quedaron cubiertos por una capa de ceniza volcánica (INSVMH, 2012).



### 3.2. Elementos en las cenizas volcánicas

Para el caso de los lixiviados, la contaminación química puede ser potencialmente nociva. Más de 55 componentes solubles han sido reportados en los lixiviados de cenizas volcánicas, generalmente se producen en las concentraciones más altas con los aniones cloruros, sulfatos, fluoruros y los cationes calcio, sodio y magnesio; en menor concentración se encuentra: manganeso, zinc, bario, selenio, bromo, boro, aluminio, silicio, cadmio, plomo, arsénico, cobre y hierro (Caselli *et al.*, 2011).

El Instituto de Geofísica reportó que en los lixiviados de las cenizas expulsadas por el volcán Popocatepetl, de Diciembre a Marzo de 1995, los contenidos de fluoruro oscilaron alrededor de las 100 ppm, estos niveles no se consideraron peligrosos para la salud como resultado de la lixiviación de cenizas (Martin del Pozzo *et al.*, 1995).

En la Tabla 5 se muestran las concentraciones de los componentes lixiviables encontrados en la ceniza volcánica proveniente de erupciones históricas, reportado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

**Tabla 5.** Elementos encontrados en ceniza volcánica de erupciones históricas

Elemento	Fuego, Costa Rica		Pacayá, Guatemala		Santiaguito, Guatemala		Monte Santa Helena, USA	
	Prom (ppm)	Máx (ppm)	Prom (ppm)	Máx (ppm)	Prom (ppm)	Máx (ppm)	Prom (ppm)	Máx (ppm)
Al	5.2	26.8	12.8	21.2	5.2	19.6	-	-
B*	0.088	0.044	0.06	0.108	1.08	3.92	-	-
Ba	0.296	1	0.68	1.12	0.132	0.348	0.152	0.24
Ca	400	1040	196	304	600	2240	440	800
Cd*	0.008	0.04	0.056	0.128	0.056	0.256	0.0052	0.0252
Cl	124	232	204	840	440	1400	392	668
Co	0.0036	0.0328	0.0072	0.024	0.132	0.6	0.0196	0.072
Cu*	0.324	2.52	1.24	2.36	1.56	2.8	0.164	0.48
F*	21.2	88	28.8	44	14.4	23.2	7.2	12
Fe	2.08	22.4	2.8	9.2	1.56	3.6	0.376	0.48
Li	0.044	0.116	0.0036	0.064	0.4	1.88	0.208	0.52
Mg	22	44	19.6	52	96	400	48	84
Mn	1.48	3.12	1	2.88	19.6	92	7.6	13.2
Na	128	184	156	440	400	1760	264	440
Pb*	0.104	0.96	0.014	0.044	0.0096	0.048	0.0092	0.072
Si*	7.2	12.4	9.2	15.2	7.6	11.2	40	56
Sr	2	5.2	1.64	2.6	1.48	4.4	1.76	2.88
V	0.06	0.128	0.0248	0.068	0.0364	0.08	0.0012	0.0264
Zn	0.144	0.56	5.6	18.8	2.04	8.4	2.04	26.8

ppm: partes por millón, Prom: promedio, Max: máximo, (\*) Elementos analizados en el presente proyecto

(Volcanicash: effects and mitigation strategies, 2009).

### 3.3. Metales pesados en suelos y cultivos

En la mayoría de los suelos agrícolas, existen pequeñas cantidades de boro, cadmio, cobre, zinc, manganeso, molibdeno, etc., en concentraciones normales, éstos favorecen el crecimiento de las plantas principalmente en sus estados tempranos, investigadores han determinado la importancia de los microelementos para el desarrollo de las hortalizas (Chang *et al.*, 1992).

Se ha encontrado que los metales introducidos a través del riego tienden a acumularse en la capa arable de los suelos mostrando que después de 80 años las concentraciones son de 3 a 6 veces mayores que en sitios con cultivos de temporal. La disponibilidad del cadmio, plomo y zinc aumenta conforme aumentan los años de riego, siendo el cadmio el más disponible, ya que se encuentra inmovilizado por la materia orgánica proveniente del agua residual adicionada a los suelos.

En muestras de alfalfa provenientes de sitios regados con agua residual se encuentra mayor contenido de cadmio, plomo, cromo y zinc y menor de cobre (Siebe, 1994).

Algunos cultivos como el maíz, cuando crecen en un suelo típicamente arcilloso, es decir, poco poroso, tienen una mayor capacidad de absorción de cadmio, níquel, plomo y cobre que en otros suelos (Mahdy *et al.*, 2007).

Estudios reportan el contenido de algunos metales pesados en cultivos de arroz que crecieron en un suelo contaminado con cadmio, cobre, plomo y zinc, encontrándose que este cultivo acumula plomo y cadmio en diferentes partes de la planta, en la parte más externa del cultivo es en donde más se acumula; sin embargo, estos metales también llegan al grano, de forma análoga esto mismo sucede con otros cultivos (Zhuang *et al.*, 2009). El rábano y la zanahoria también absorben metales como el cadmio y el zinc; en las hojas de los rábanos se llegan a acumular mayores contenidos del metal, provocando marchitamiento en las hojas y disminución en la longitud de sus raíces; para zanahorias se reporta acortamiento en raíces y en éstas mayor acumulación del metal (Intawongse *et al.*, 2006).

Para el caso de los suelos, se ha demostrado que el cobre, cadmio, zinc y plomo presente en el suelo se encuentran absorbidos en la fracción orgánica (Flores *et al.*, 1997).

## 4. Metodología

### 4.1. Procedencia de las muestras

#### 4.1.1. Cultivos y suelos

Los cultivos y suelos analizados en el presente proyecto fueron elegidos con base en los municipios y comunidades que se encuentran más expuestos a la caída de ceniza volcánica según reportes del CENAPRED. Dichos reportes indican que la última fecha en la que se registró caída de ceniza antes del primer muestreo fue el 24 de Mayo del 2012 en los municipios de Tochimilco, San Pedro Benito Juárez y Atlixco.

Se realizaron tres muestreos: 15 de Noviembre del 2012, 29 y 30 de Enero del 2013. En la Figura 7 y 8 se puede observar la ubicación geográfica de los puntos de muestreo respecto al volcán y en la Tabla 6 se encuentran, por municipio, los cultivos según la fecha de muestreo.

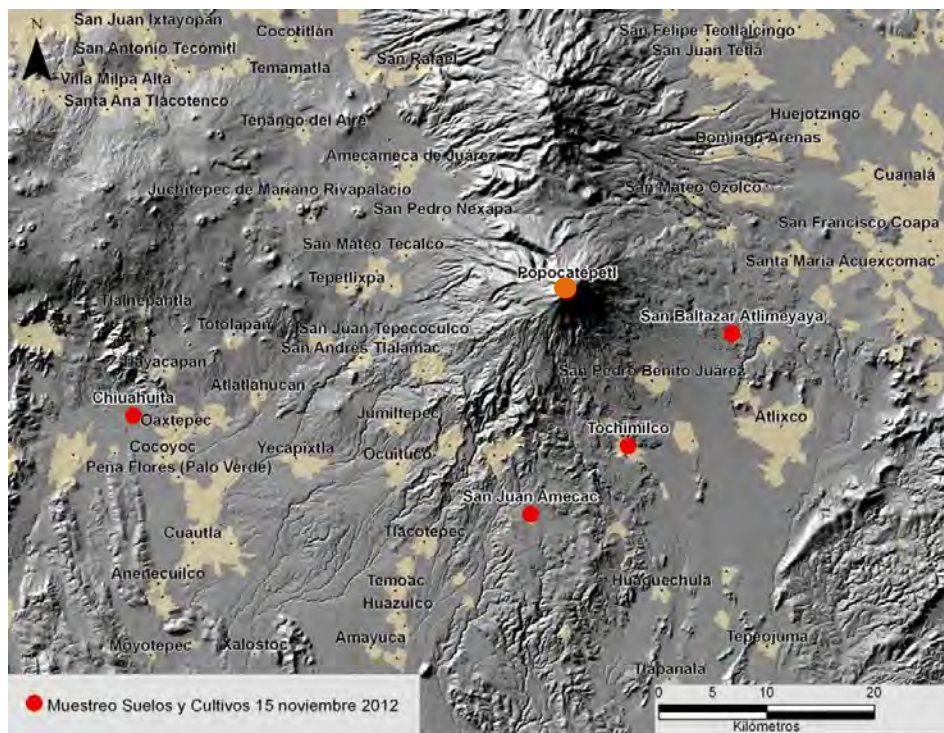
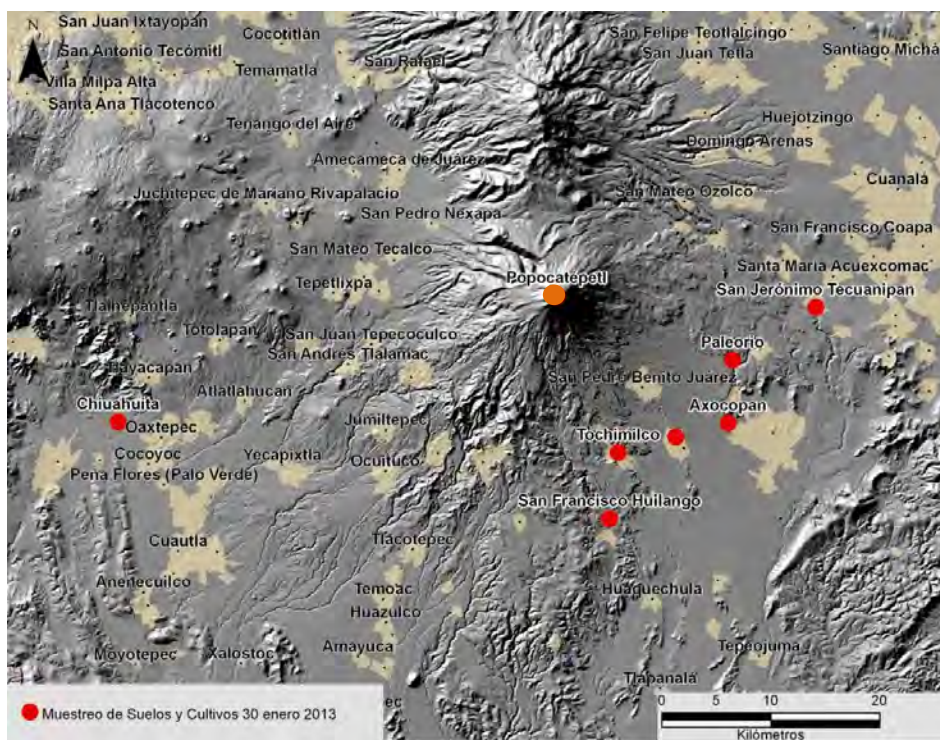


Figura 7. Puntos de muestreo del 15 de Noviembre del 2012 para suelos y cultivos.



**Figura 8.** Puntos de muestreo del 29 y 30 de Enero del 2013 para suelos y cultivos.

**Tabla 6.** Detalles por municipio de los cultivos y suelos muestreados

Región Municipio	Cultivo	Suelo	Fecha de muestreo	Número de muestras (cultivos)
Metepec	tejocote	✓	15 Nov 2012	8
San Juan Amecac	guayaba		15 Nov 2012	7
	ciruela amarilla			13
Tochimilco	jícama	✓	15 Nov 2012	3
Chihuahuita	mandarina	✓	15 Nov 2012	3
	lima			4
	naranja			2
Chihuahuita **	fresa	✓	29 Enero 2013	15
San Francisco Huilango	chirimoya		29 Enero 2013	3
	durazno			12
	guayaba			8
Tochimilco **	calabaza	✓	29 Enero 2013	7
	flor de calabaza			4
Huexocoapan	rábano	✓	29 Enero 2013	9
Paleorio	chirimoya	✓	30 Enero 2013	3
San Jerónimo Tecuanipan	cebolla	✓	30 Enero 2013	2

✓Suelo muestreado. (\*\*)Diferente fecha de muestreo.



#### 4.1.2. Ceniza volcánica

La ceniza volcánica analizada proviene de las localidades cercanas al volcán Popocatepetl. Dichas cenizas son muestras que ya tenía el CENAPRED antes de iniciar el presente proyecto, a las cuales se les determinaron los mismos elementos que a los suelos y cultivos.

En la Figura 9 se observa la ubicación geográfica de los puntos de muestreo respecto al volcán y en la Tabla 7 se encuentran las muestras de ceniza según la fecha de muestreo

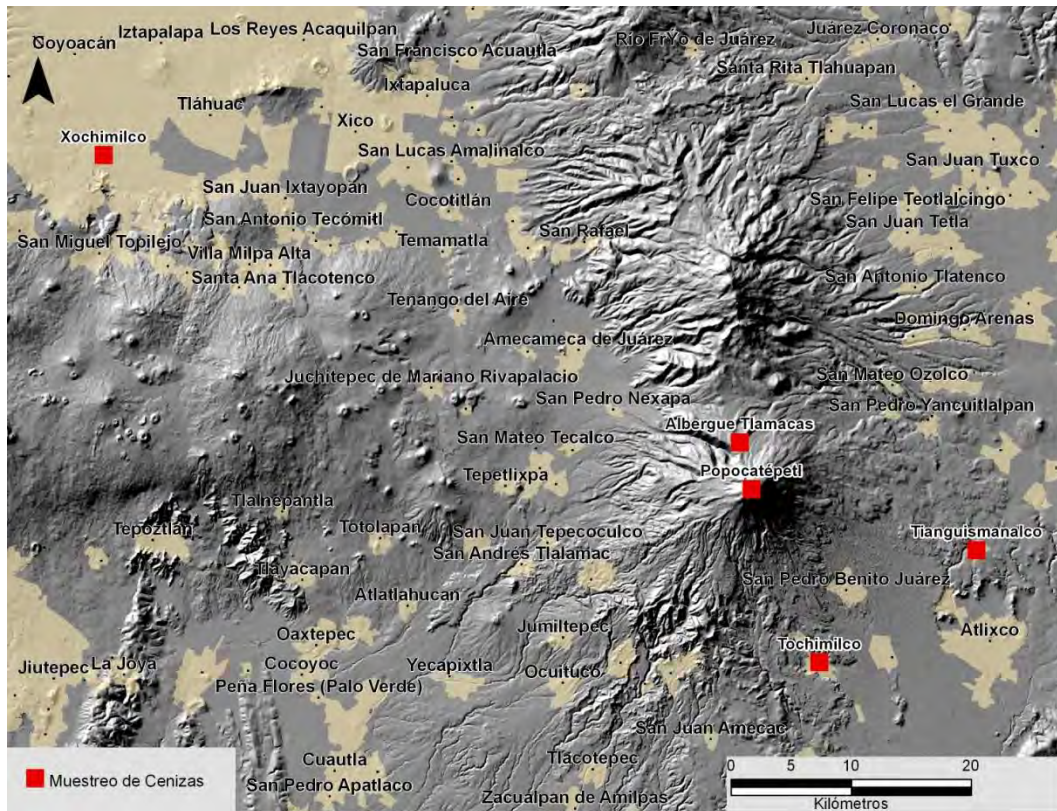


Figura 9. Puntos de muestreo de las cenizas analizadas

Tabla 7. Detalles por municipio de ceniza muestreada

Muestra	Fecha de muestreo	Lugar de procedencia
Tianguismanalco	9 de Mayo 2012	Azotea de la presidencia municipal
Xochimilco	Desconocida	Xochimilco
Tlamacas	26 de Abril	Tlamacas parabólica
Tlamacas**	16 de Mayo	
Tochimilco	14 de Abril	Tochimilco
Tlamacas ps	16 de Mayo	Tlamacas panel solar

(\*\*) Diferente fecha de muestreo

## 4.2. Muestreo y transporte

Todos los suelos y cultivos que se presentan fueron muestreados utilizando la misma metodología y realizando las determinaciones por duplicado.

### 4.2.1. Cultivos

Las muestras fueron tomadas del campo de cultivo, se guardaron en bolsas de plástico identificadas con información del cultivo, fecha y lugar de muestreo para posteriormente colocarlas en un recipiente de plástico. De esta manera fueron transportadas a las instalaciones del CENAPRED para ser analizadas. Una vez hecho el muestreo y teniendo los cultivos en el laboratorio se mantuvieron en refrigeración.

En la Figura 10 se pueden observar los campos de cultivo de fresa (los demás cultivos se encuentran en el Apéndice B).



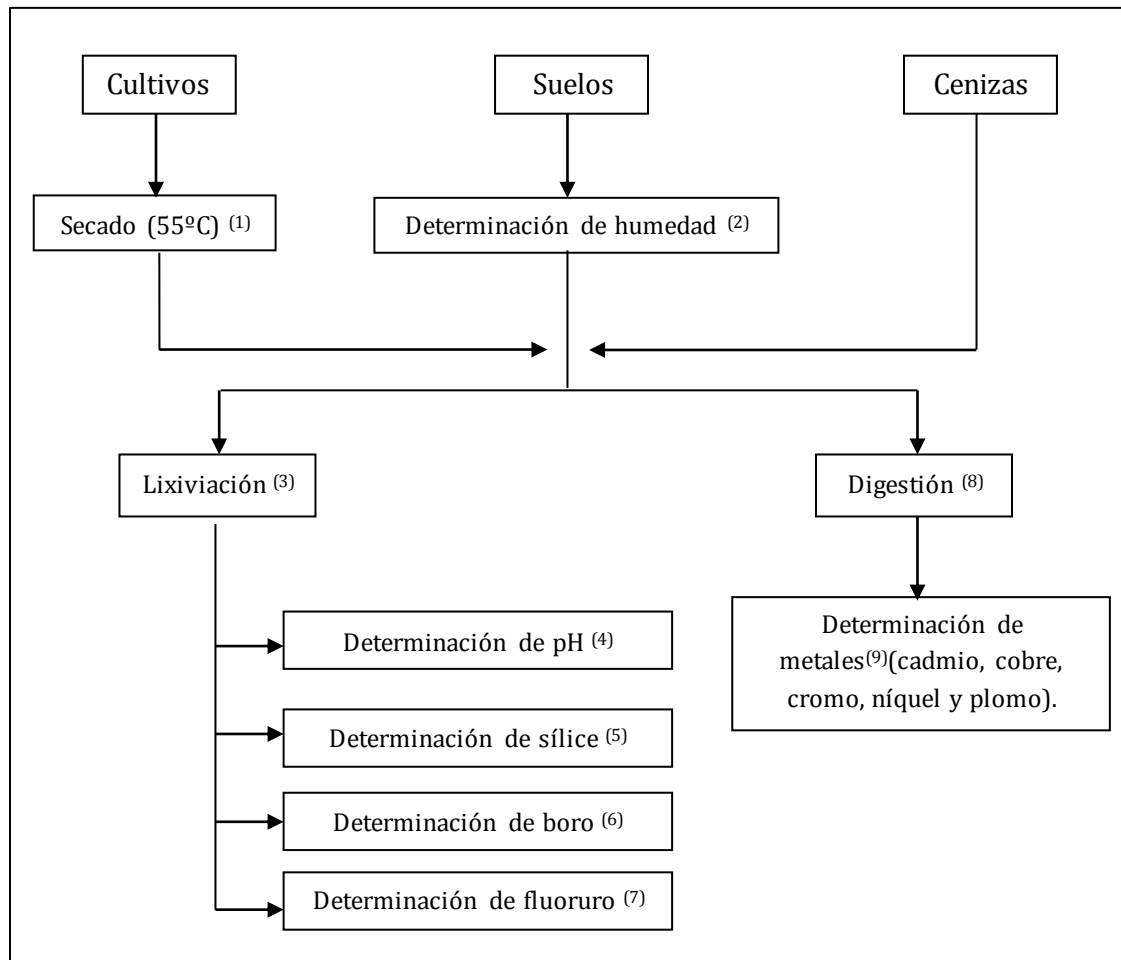
**Figura 10.** Campos de cultivo de fresa y fresa recolectada (de Chihuahuita)

### 4.2.2. Suelos

El suelo se tomó directamente del campo de cultivo, con la ayuda de una espátula se vació en frascos de vidrio con tapa, identificados con nombre, fecha y lugar del muestreo. Todos los frascos se colocaron en un recipiente de plástico para su transporte. Una vez en el laboratorio dichos frascos se mantuvieron en refrigeración hasta el momento de su análisis.

## 4.3. Diagrama experimental

A las muestras de cultivos, suelos y cenizas se les determinó pH, sílice, fluoruro, boro y algunos metales (cadmio, cobre, cromo, níquel y plomo). Para el caso de los cultivos, previo a dichos análisis, se secaron en estufa y para el caso de los suelos se determinó el porcentaje de humedad. Posteriormente todas las muestras se digirieron o se lixiviaron dependiendo del análisis a realizar. En la Figura 11 se puede observar el diagrama experimental.



**Figura 11.** Diagrama experimental para la determinación de metales pesados y otros elementos en la ceniza volcánica, suelos y cultivos. (Los números que aparecen en el diagrama están referidos en la sección 4.4.)

## 4.4. Procedimiento

### 4.4.1. Secado en estufa <sup>(1)</sup>

Este procedimiento se realizó mediante estufa de aire forzado (marca Binder).

Se cortaron los cultivos en rebanadas delgadas, excepto la flor de calabaza que se manejó entera. Se dejaron en la estufa a 55 °C hasta sequedad, el tiempo de secado fue variable debido al contenido de humedad de cada cultivo (para el caso de los cítricos se analizó el jugo). En la Figura 12 se muestra la fresa recién llegada al laboratorio y después del tratamiento de secado (los demás cultivos se encuentran en el Apéndice C).

Una vez secos los cultivos se molieron en mortero y posteriormente, para su almacenamiento, se dejaron identificados en frascos de plástico con tapa.

Para el caso de los cultivos, es importante mencionar que horas antes de digerirlos o lixiviarlos se secaron nuevamente en la estufa a 55°C durante 2 horas.



**Figura 12.** Fresa recolectada (izquierda). Fresa rebanada después de secarla en estufa (derecha).

#### **4.4.2. Humedad <sup>(2)</sup>**

El método para la determinación de humedad se realizó mediante termobalanza, de acuerdo a la norma NMX-F-428-1982.

Se colocaron uniformemente de 0.5 a 1 g. de muestra en el plato de la termobalanza, posteriormente la muestra se expuso a 110 °C durante un tiempo aproximado de 20 minutos, (el tiempo de exposición dependió del contenido de agua de cada muestra). El análisis finalizó al marcar en la termobalanza peso constante.

#### **4.4.3. Lixiviación <sup>(3)</sup>**

El método para lixiviar las muestras es el que se ha usado en muestras geoquímicas descrito por Armienta *et al.*, 2011.

Se pesó aproximadamente 1 g de muestra, se colocó en un matraz Erlenmeyer y se adicionaron 25 mL de agua desionizada. Se mantuvo en agitación (equipo Lab Companion SI-600) a 150 rpm durante 2 horas. Se centrifugó (Hettich Zentrifugen Universal 320 R) a 3500 rpm durante 15 minutos, se transvasó cuidadosamente el sobrenadante con una pipeta Pasteur a un frasco de plástico con tapa y se almacenó en refrigeración.

#### **4.4.4. pH <sup>(4)</sup>**

El pH del lixiviado se midió directamente en el vaso donde se almacenó, con un potenciómetro (Boeco Germany pH-meter BT-600), calibrado con buffer de 4, 7 y 9.



#### 4.4.5. Sílice<sup>(5)</sup>

Esta determinación se realizó con base en el Método de molibdisilicato (Método del molibdisilicato 4500-SiO<sub>2</sub> Silica en Eaton *et al.*, 2005).

Se agregaron 5 mL del lixiviado de la muestra en un tubo de ensaye, 0.5 mL de ácido clorhídrico al 10% y 0.5 mL de molibdato de amonio al 10%. Se agitó la mezcla y se dejó reposar durante 5 minutos. Se le agregaron 0.2 mL de ácido oxálico al 10%, se agitó y se dejó reposar durante 2 minutos. Se le agregaron 10 mL de sulfito de sodio al 17%, se agitó y se dejó reposar durante 2 minutos. Posteriormente se midió la absorbancia en un espectrofotómetro (Perkin-Elmer Lambda 25, UV/Visible spectrometer) a 650 nm. La concentración de sílice se obtuvo por referencia a una curva de calibración la cual se construyó a partir de la disolución patrón de sílice (SiO<sub>2</sub>) de 50 ppm. Las concentraciones incluidas en la curva fueron desde 0 hasta 20 ppm. El volumen final en cada tubo fue de 5 mL como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 8.** Concentraciones para la curva patrón de sílice

<b>Concentración (ppm)</b>	<b>0</b>	<b>2.5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>
<b>Disolución patrón (mL)</b>	0	0.25	0.5	1.0	1.5	2.0
<b>Agua desionizada (mL)</b>	5	4.75	4.5	4.0	3.5	3.0

#### 4.4.6. Boro<sup>(6)</sup>

El método para la determinación de boro se realizó mediante espectrofotómetro (Perkin-Elmer Lambda 25, UV/Visible spectrometer), de acuerdo a la norma NMX-AA-063-SCFI-2001.

En una cápsula de porcelana se agregaron 0.4 mL de muestra (lixiviada) y 1.6 mL de disolución de curcumina, se agitó suavemente para mezclar los contenidos. Se metió la cápsula de evaporación en un baño de agua caliente (temperatura controlada 55°C ± 2°C) y se evaporó la disolución hasta llevarla a sequedad. Transcurridos 15 minutos se retiró la cápsula de evaporación del baño de agua caliente y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Se lavó el contenido de cada capsula adicionando 9 mL de alcohol isopropílico en fracciones de 3 mL. Se transvasó el contenido a un tubo de ensaye, se agitó y se midió la absorbancia en un espectrofotómetro a 540 nm.

La concentración de boro se obtuvo por referencia a una curva de calibración preparada con la disolución intermedia de boro en un rango de concentración desde 0.1 ppm hasta 1.0 ppm

\*Se preparó un blanco junto con las muestras.

#### 4.4.7. Fluoruro<sup>(7)</sup>

La determinación de fluoruro se realizó mediante el método electrodo ion selectivo (marca Beckman) de acuerdo a la norma NMX-AA-077-SCFI-2001.

Se calibró el electrodo siguiendo las instrucciones del fabricante. En un vaso de precipitados se agregó una alícuota de 5 mL de muestra lixiviada y 5 mL de buffer (ISA), se mezcló con un agitador magnético y se realizó la medición en el potenciómetro (en milivolts).

La concentración de flúor se obtuvo por referencia a una curva de calibración preparada con la disolución intermedia de flúor en un rango de concentración de 0.1 ppm hasta 1.0 ppm

#### 4.4.8. Determinación de metales pesados

La determinación de cadmio, cobre, cromo, níquel y plomo se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica (Shimadzu AA-6300) (Figura 13).



Figura 13. Espectrofotómetro de absorción atómica (CENAPRED, 2013)

##### 4.4.8.1. Digestión en horno de microondas<sup>(B)</sup>

La digestión de muestras se realizó mediante horno de microondas (Ethos 1. Milestone).

Dentro del vaso de microondas, se pesó 1 g de muestra y se le agregaron 10 mL de ácido nítrico concentrado. Se digirió la muestra dentro del horno de microondas con las condiciones mostradas en la Tabla 9 (basadas en el cookbook del fabricante). Al terminar la digestión se filtró la muestra, se aforó con agua desionizada y se almacenó en vasos de plástico previamente lavados en ácido nítrico al 25%.

Tabla 9. Condición de las digestiones

Tiempo (min)	E(w)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
10	1100	160	100
5	1100	160	120
10	1100	250	120
15	1100	250	120

#### 4.4.8.2. Determinación de cadmio, cobre, cromo, níquel y plomo por espectrofotometría de absorción atómica <sup>(9)</sup>

Se ajustó el equipo de absorción atómica de acuerdo a las indicaciones del manual de operación del fabricante, para el caso de cadmio, cobre, níquel y plomo se utilizó el quemador a una altura de 7 mm y para el caso de cromo a 9mm, el tipo de flama empleado, para todos los metales, fue aire/acetileno. Se dejó calentar la lámpara correspondiente de acuerdo al elemento durante un tiempo de 30 minutos. Se verificó la sensibilidad del instrumento con las soluciones estándares de cada elemento, preparadas en las concentraciones marcadas en el manual de operación. Se ajustó el instrumento a cero con el blanco de calibración y soluciones estándar de menor a mayor concentración. Mediante la computadora integrada al equipo y con los datos obtenidos, se elaboró la curva patrón de cada metal (Figura 14), para fines prácticos sólo se muestra una curva de cada elemento.

La muestra previamente digerida se aspiró en el equipo de absorción atómica por duplicado y se determinó la concentración por referencia a la curva patrón antes mencionada (el rango de concentraciones varía de acuerdo al elemento a analizar; (se usó como guía el cookbook del fabricante).

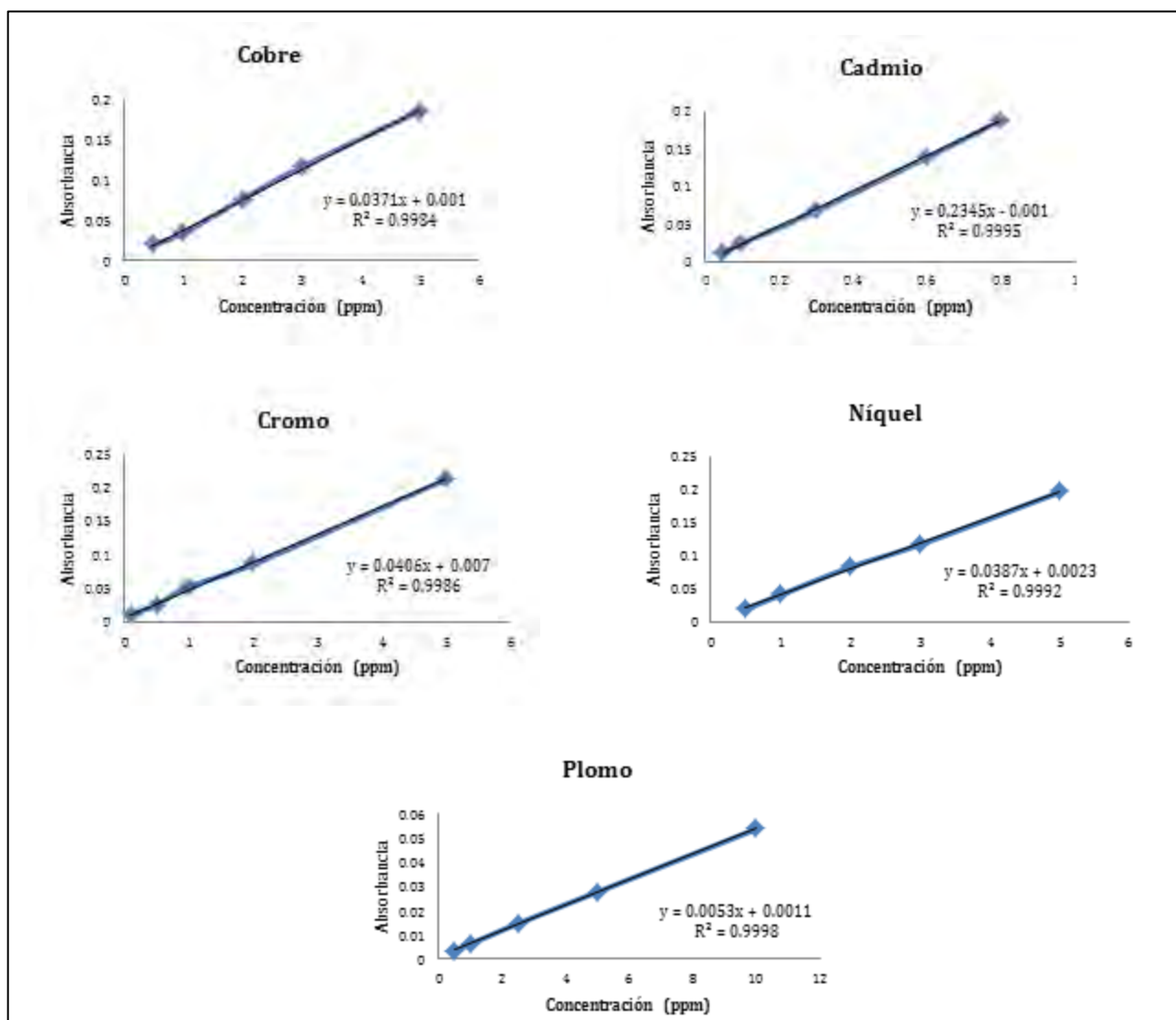


Figura 14. Curvas patrón de los elementos analizados.

## 5. Resultados y discusión

### 5.1. pH

#### - *Suelos y cenizas*

En la Tabla 10 se muestran los valores obtenidos de pH para suelos y cenizas. En la Figura 15, considerando la NOM-021-RECNAT-2000 (Tabla 3), se puede observar que los valores se encuentran, para las cenizas, en intervalos clasificados como moderadamente ácidos a excepción de Xochimilco que se encuentra como moderadamente alcalino; para los suelos, la mayoría tienen pH moderadamente ácido (Tochimilco\*\*, San Jerónimo, Paleorío, Metepec y Chihuahuita), otros con pH neutro (Huexocoapan y Chihuahuita \*\*) y sólo uno como fuertemente ácido (Tochimilco).

Es importante considerar que de este parámetro dependerá, en parte, la biodisponibilidad y el comportamiento (movilidad entre otras cosas) de los metales en el suelo así como la facilidad que tendrán los cultivos para absorber éstos (Prieto *et al.*, 2009). A pH moderadamente alto se produce una precipitación de los cationes como hidróxidos o carbonatos y quedan retenidos en formas no disponibles para las plantas; en medios muy ácidos pueden pasar nuevamente a la solución en forma de hidroxicomplejos (Palacios *et al.*, 1998; Román *et al.*, 2009).

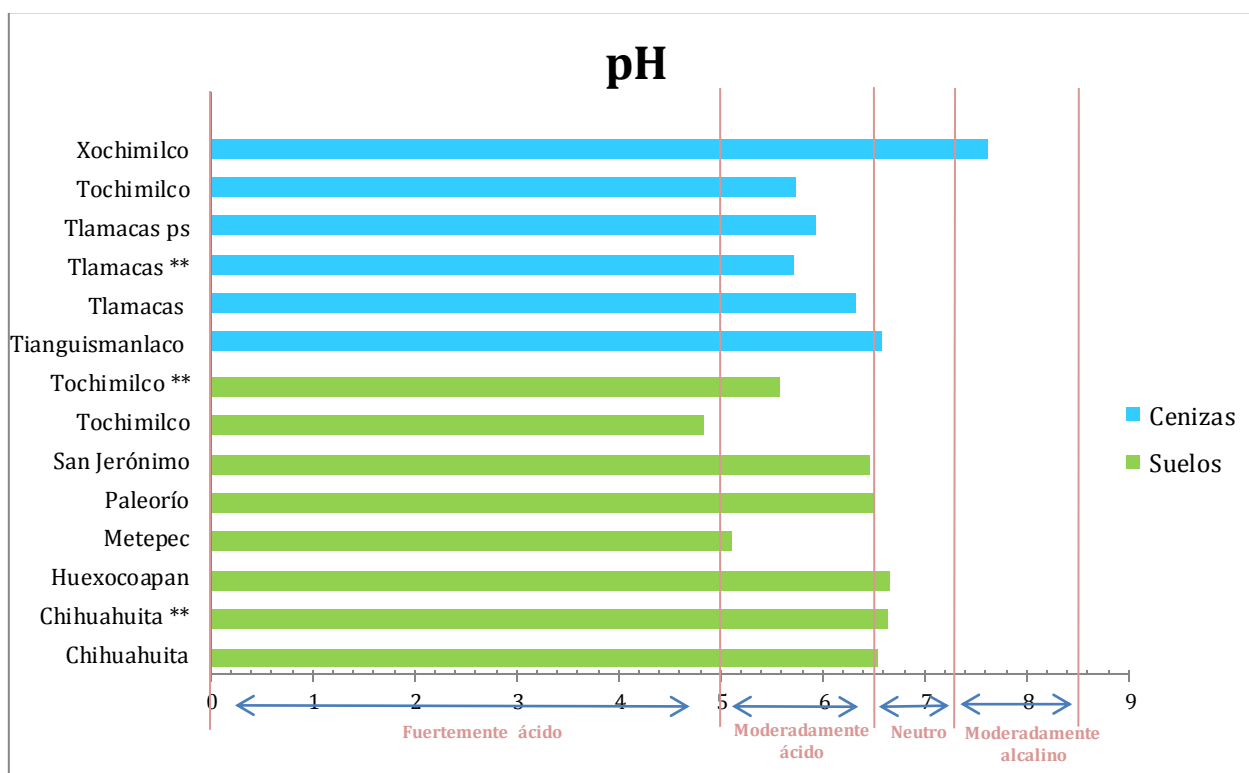


Figura 15. pH de cenizas y suelos.

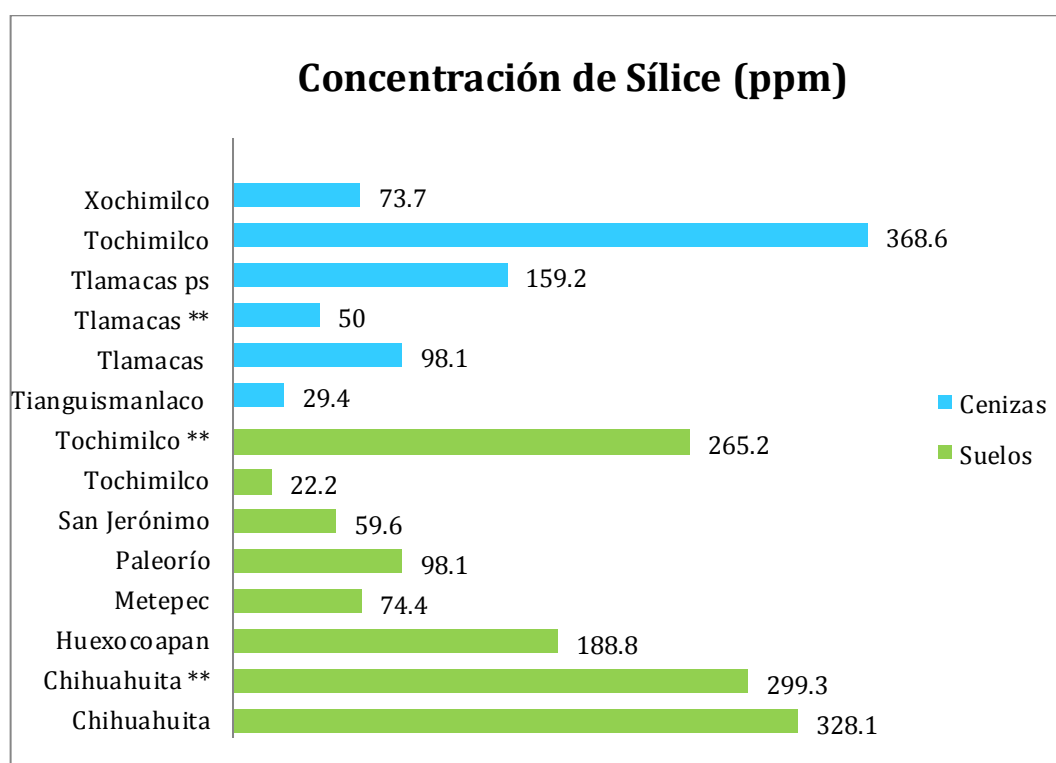
## 5.2. Sílice

### - *Suelos y cenizas*

Uno de los elementos encontrados en la ceniza volcánica fue el sílice como lo muestran otros autores (Tabla 5) este elemento también se encontró en los suelos en concentraciones variables; como se puede observar en la Figura 16 el sílice es mayor en los municipios de Chihuahuita y Tochimilco con aproximadamente 300 ppm, seguido del municipio de Huexocoapan con aproximadamente 200 ppm, todos los demás presentan concentraciones menores a 100 ppm.

Se ha reportado que al aumentar el pH la concentración de sílice también aumenta (Quero, 2008); sin embargo, para los resultados aquí mostrados no se observa esa relación.

Debido a que no existe norma que regule el sílice en suelos agrícolas, se consideró el valor de DL<sub>50</sub> (3160 ppm) reportado por la Agencia de Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ASTRE, 2008) con lo que se puede decir que para los valores encontrados en suelos y cenizas aparentemente no existe riesgo para la salud; no hay que olvidar que también el daño dependerá del tiempo de exposición.



**Figura 16.** Concentración de sílice en cenizas y suelos.

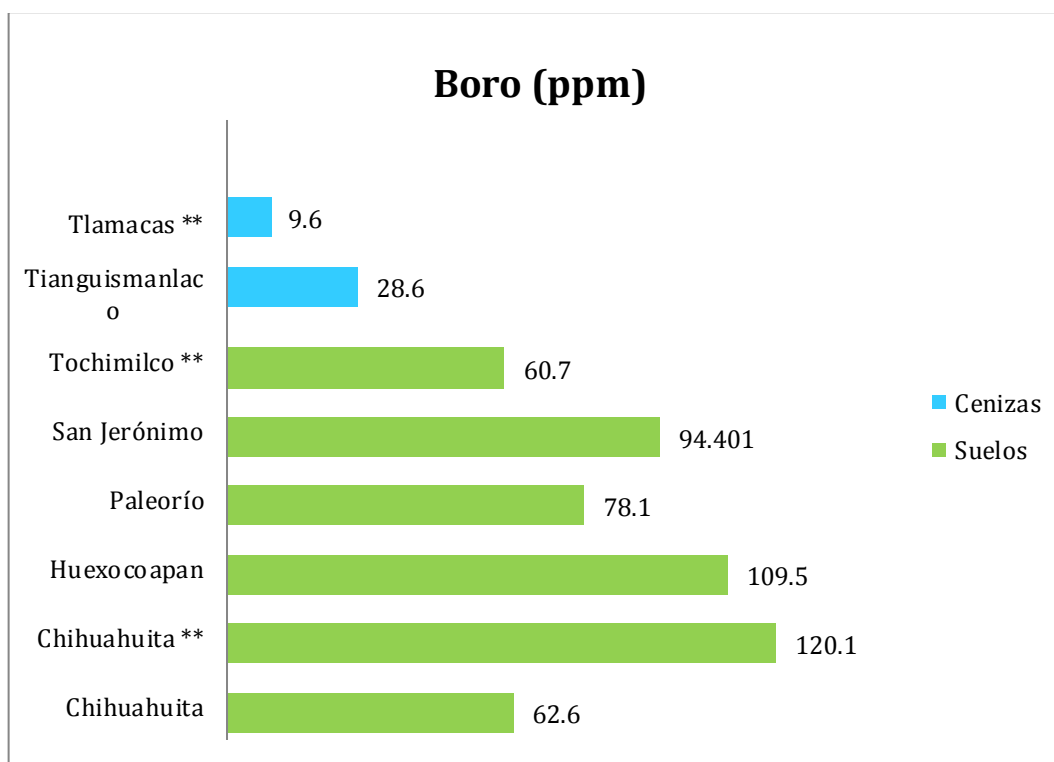
### 5.3. Boro

#### - *Suelos y cenizas*

Para el caso del boro, como se muestra en la Figura 17, sólo dos de las seis muestras de cenizas analizadas (Tlamacas\*\* y Tianguismanlaco) presentaron este elemento, las concentraciones oscilaron entre las 10 y 30 ppm; para el caso de los suelos las que tuvieron mayor contenido de boro fueron San Jerónimo, Paleorío, Huexocoapan y Chihuahuita\*\* cerca de las 100 ppm mientras que Tochimilco\*\* y Chihuahuita tuvieron entre 50 y 60 ppm.

No se encontró norma que regule el contenido de boro en suelos agrícolas.

Al realizar una comparación entre el contenido de boro en suelos y cenizas se puede observar que los suelos retienen más este elemento lo cual puede deberse al tipo de interacciones que el boro tiene con la materia orgánica formando en el suelo compuestos más estables que en las cenizas.



**Figura 17.** Concentración de boro en cenizas y suelos.

## 5.4. Fluoruro

### - *Suelos y cenizas*

En la Figura 18 se puede observar el contenido de fluoruro en suelos y cenizas, las mayores concentraciones se encontraron en el grupo de cenizas con alrededor de 100 ppm en el municipio de Tianguismanalco, para suelos la concentración máxima fue de aproximadamente 20 ppm en el municipio de Chihuahuita, la baja concentración en suelos puede atribuirse a que los fluoruros presentes no se quedan retenidos sino que son acumulados por las plantas, la cantidad que éstas acumulen dependerá del tipo de planta y de la naturaleza del suelo (ASTRE, 1995), es posible considerar que la baja concentración de fluoruro en el suelo puede deberse a que en él se forman compuestos poco estables por lo que lixivian fácilmente.

El fluoruro de sodio, fluoruro de hidrógeno y flúor han sido clasificados como sustancias peligrosas por la EPA la cual establece que la cantidad máxima de fluoruro que se permite en el agua potable es de 4.0 mg/L. La Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA por sus siglas en inglés) ha establecido que durante una jornada de ocho horas el límite para flúor, ácido fluorhídrico y fluoruro es de 0.2 mg/m<sup>3</sup>, 2.0 mg/m<sup>3</sup> y 2.5 mg/m<sup>3</sup> respectivamente.

La ingesta diaria promedio de fluoruro para adultos a través de los alimentos y el agua va desde 1 mg hasta 2.7 mg estos niveles dependen del contenido de fluoruro que haya en el agua que consumen (ASTRE, 1995).

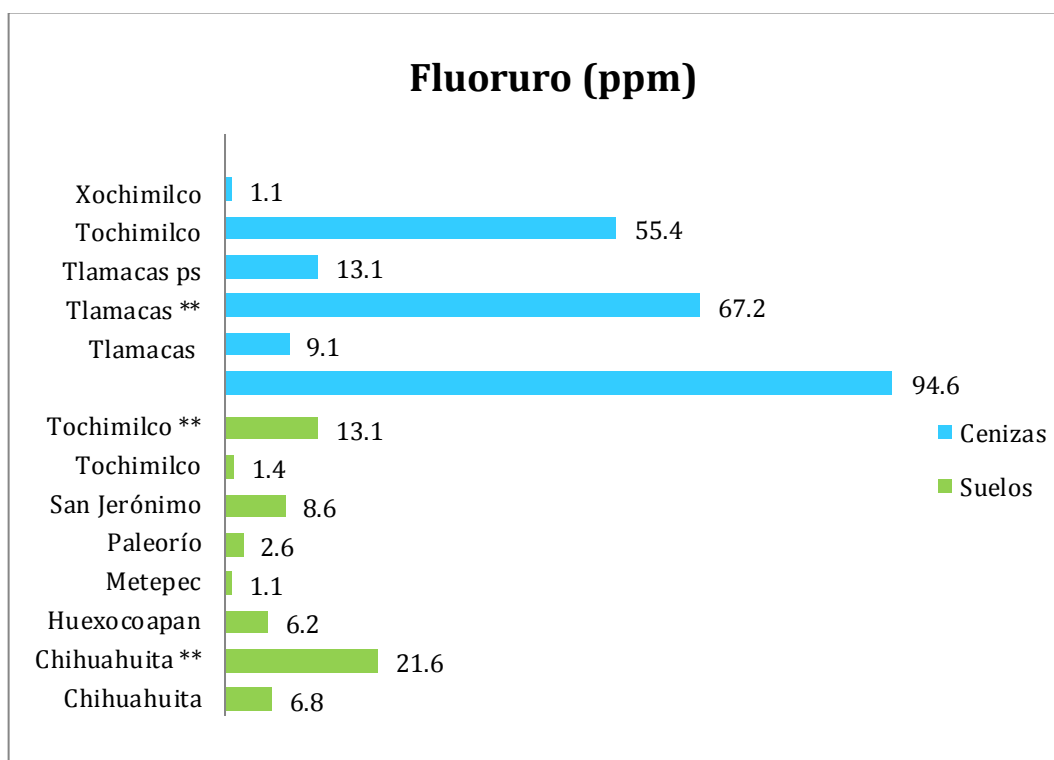


Figura 18. Concentración de fluoruro en cenizas y suelos.

## 5.5. Cadmio

### - *Suelos y cultivos*

En la Figura 19 se muestra la concentración de cadmio para los diferentes cultivos y suelos analizados. Es posible agrupar los resultados dependiendo de si el cadmio se encontró sólo en los suelos, sólo en los cultivos o en ambos. Para el primer caso se menciona el municipio de Metepec en el que a pesar de encontrar cadmio en los suelos no se detectó en ningún cultivo esto pudo deberse a que el valor de pH de dicho suelo se encuentra como moderadamente ácido (5.11); para el caso en el que sólo los cultivos absorbieron dicho elemento se encontró la fresa proveniente del municipio de Chihuahuita, chirimoya y guayaba de San Francisco Huilango, chirimoya de Paleorío y cebolla de San Jerónimo, aparentemente si en el suelo existe cadmio los cultivos lo absorben y acumulan fácilmente; lo anterior no quiere decir que los suelos no contengan dicho metal sino que es probable que la concentración es tan baja que se encuentra por debajo del límite de detección del equipo (Acosta, 2007; Prieto *et al.*, 2007); para el tercer caso se encuentran los municipios de Tochimilco \*\* y Huexocoapan en ambos se detectó cadmio en suelos y cultivos, las concentraciones en suelos son al menos el doble de lo que se encontró en los cultivos, el pH de estos suelos es moderadamente ácido (5.58) y neutro (6.66) respectivamente. Los cultivos de Tochimilco\*\* (calabaza y flor de calabaza) fueron los que menor concentración de cadmio presentaron. En todos los cultivos control no se encontró dicho elemento.

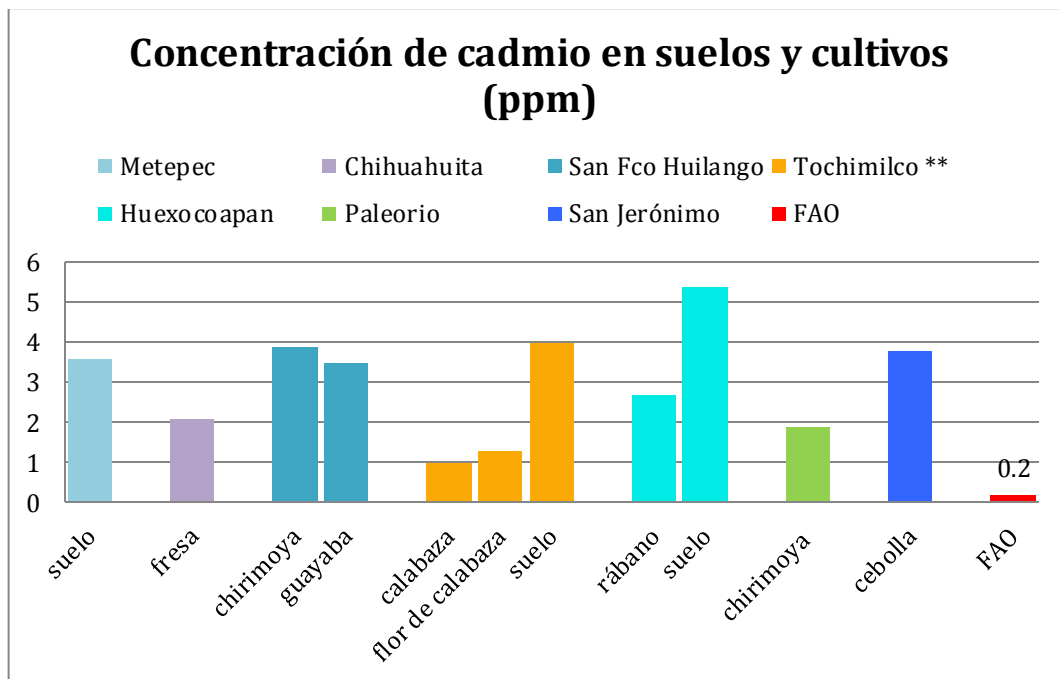
En 8 de los 25 cultivos analizados se encontró cadmio, los que presentaron mayor concentración fueron chirimoya, cebolla y guayaba con 3.9 ppm, 3.8 ppm, 3.5 ppm respectivamente.

Aparentemente, entre más ácido sea el suelo los cultivos acumulan menos cadmio. Se sugiere hacer más estudios al respecto ya que se ha reportado que a pH ácido el cadmio se hace más disponible para las plantas (Palacios *et al.*, 1998).

Por lo anterior se puede decir que el pH es un parámetro determinante para la absorción de este elemento además que todos los cultivos no lo acumulan en la misma cantidad por lo que el contenido de cadmio no sólo dependerá del pH del suelo sino también del cultivo en cuestión.

No se encontró norma mexicana que regule el contenido de cadmio en los alimentos, por lo que se consultó el límite que establece la FAO para vegetales el cual es de 0.2 ppm en peso seco (Kihampa *et al.*, 2011), por lo anterior se puede decir que todos los cultivos en los que se encontró cadmio sobrepasan los límites establecidos y representan riesgo para la salud.



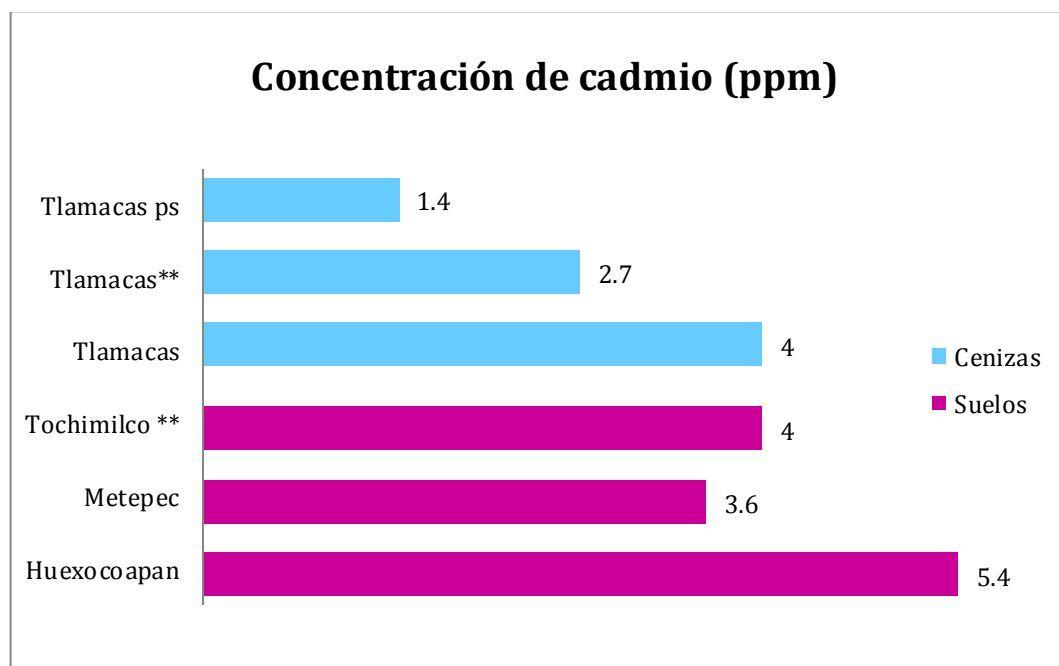


**Figura 19.** Concentración de cadmio en suelos y cultivos. (\*\*\*)Cultivos control.

**- Cenizas y suelos**

En la Figura 20 se puede observar que la concentración de cadmio en cenizas y suelos es muy parecida. El municipio que presentó mayor contenido de este elemento fue Tlamacas en cenizas con una concentración de 4ppm y Huexocoapan en suelos con una concentración de 5.4 ppm.

Considerando la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 la cual indica que el límite para cadmio en suelos agrícolas es de 37 ppm se puede decir que la concentración en suelos no sobrepasa los límites establecidos por la Norma Oficial.



**Figura 20.** Concentración de cadmio en cenizas y suelos

## 5.6. Cobre

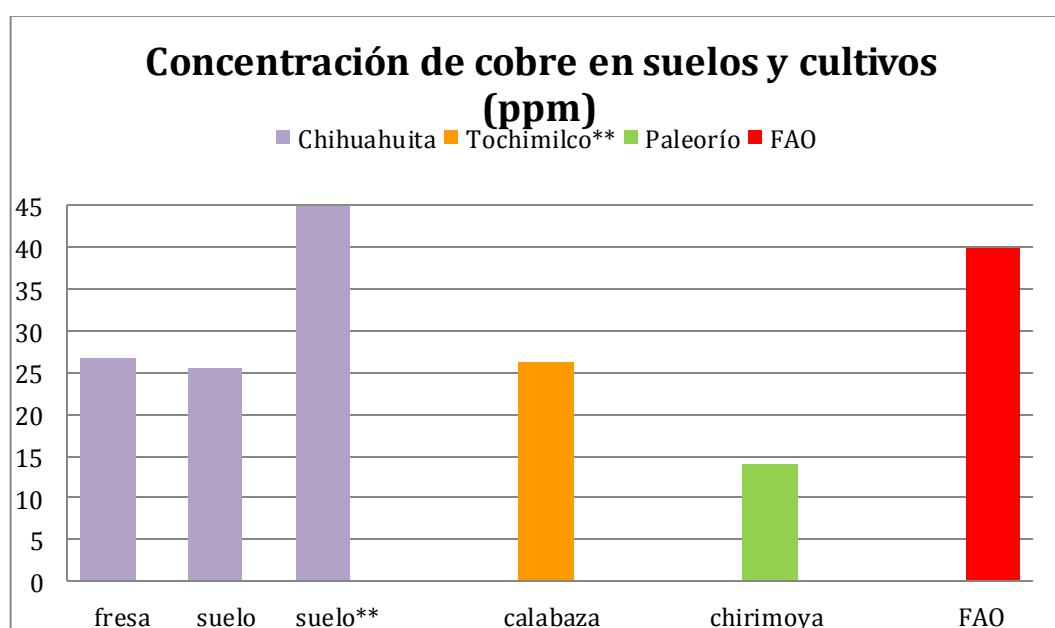
### - *Suelos y cultivos*

En la

Figura 21 se puede observar el contenido de cobre en suelos y cultivos. El único suelo que presentó dicho elemento fue el proveniente del municipio de Chihuahuita con una concentración de 25.5 ppm y 44.9 ppm para ambas fechas de muestreo; solamente en 3 de los 25 cultivos analizados se encontró dicho elemento. En Chihuahuita el único cultivo que acumuló cobre fue la fresa ésta presentó la mayor concentración de todos los cultivos analizados para este elemento con 26.8 ppm, el pH de este suelo se clasifica como neutro. En los municipios de Tochimilco\*\* y Paleorío, a diferencia del caso anterior, no se detectó cobre en suelos únicamente en cultivos, para el caso de la calabaza proveniente de Tochimilco\*\* la concentración fue de 26.2 ppm mientras que para la chirimoya proveniente de Paleorío la concentración fue de 14 ppm, estos suelos se consideran como moderadamente ácido y neutro respectivamente, es posible notar que a pesar de que la fresa y la calabaza tuvieron condiciones diferentes de pH ambos cultivos acumulan este elemento en concentraciones muy parecidas lo cual indica que el cobre aunque aparentemente se encuentre más disponible a pH neutro también puede ser acumulado por alguno cultivos a pH moderadamente ácido, así mismo se puede decir que la acumulación de este metal no sólo depende del pH sino también de la naturaleza del cultivo.

Se ha reportado que este elemento es poco sensible a los cambios de pH, es decir, se encuentra fijado en los suelos (Prueb, 1997). Con los datos aquí mostrados se puede decir que a pH moderadamente ácido el cobre se encuentra disponible para las plantas.

No se encontró norma mexicana que regule el contenido de cobre en los alimentos, por lo que se consultaron los límites que establece la FAO (Kihampa *et al*, 2011) la cual indica que en vegetales el límite es de 40 ppm en peso seco, por lo anterior se puede decir que todos los cultivos en los que se encontró cobre están por debajo de los niveles permitidos de modo que no representan algún riesgo para la salud.

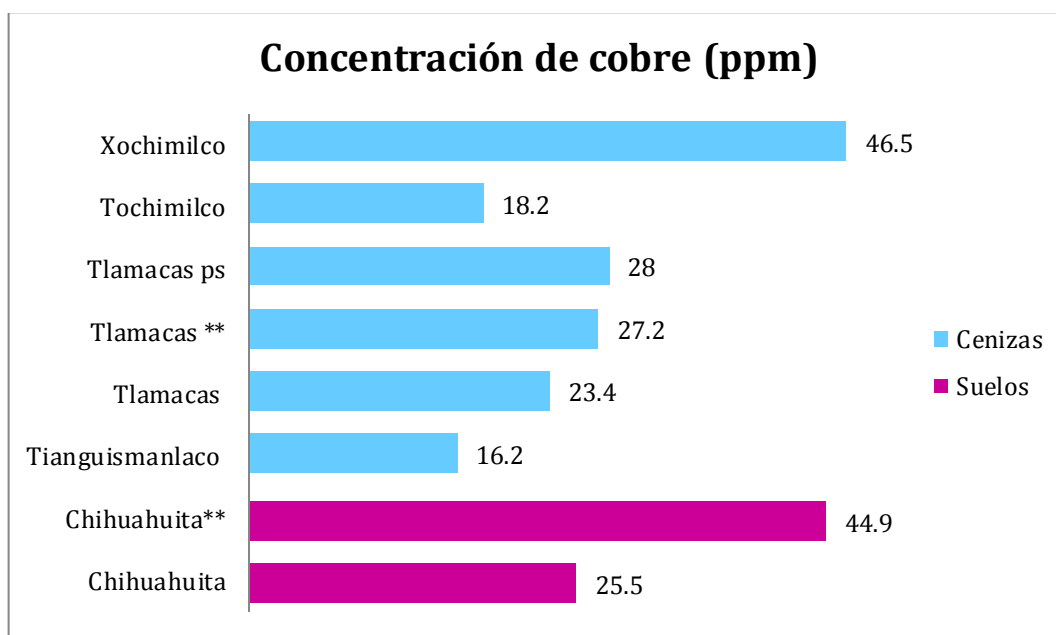


**Figura 21.** Concentración de cobre en suelos y cultivos. (\*\*)Diferentes fechas de muestreo. (\*\*\*)Cultivos control.

- **Suelos y cenizas**

En la Figura 22 se puede observar que la concentración de cobre en suelos y cenizas, es variable en todos los casos y no se encuentra alguna relación entre el pH de cada municipio y el contenido de este elemento en suelos y cenizas.

En la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 no está regulado el contenido de este elemento en suelos destinados para uso agrícola.



**Figura 22.** Concentración de cobre en suelos y cenizas. (\*\*)Diferentes fechas de muestreo.

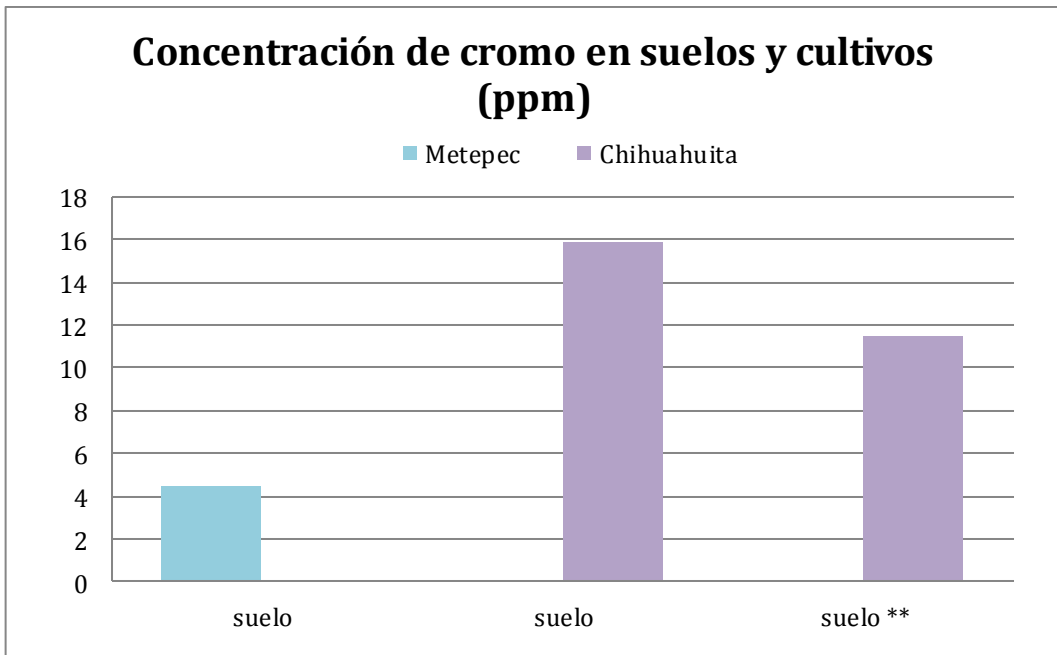
## 5.7. Cromo

- **Suelos y cultivos**

En la Figura 23 se puede observar el contenido de cromo en suelos, en los cultivos no se detectó dicho elemento. Los suelos con cromo fueron los provenientes de los municipios de Metepec, Chihuahuita y Chihuahuita\*\* con concentraciones de 4.5 ppm, 15.9 ppm y 11.5ppm respectivamente, el pH de estos suelos es moderadamente ácido siendo el de Metepec más bajo que el de Chihuahuita; estudios demuestran que este elemento tiende a estar más disponible para los cultivos a pH alcalino (Kabata-Pendias, 2001), razón por la cual ningún cultivo en un suelo con pH ácido acumuló dicho elemento, para aquellos cultivos que se encuentran en un suelo alcalino es probable que la forma disponible no es la que pueden acumular.

No se encontró Norma Mexicana que regule el contenido de cromo en los alimentos, por lo que se consultaron los límites que establece la FAO (Kihampa *et al*, 2011) la cual indica que

en vegetales el límite es de 40 ppm en peso seco, este elemento no representa ningún riesgo para la salud.



**Figura 23.** Concentración de cromo en suelos y cultivos. (\*\*)Diferentes fechas de muestreo.

- **Suelos y cenizas**

En la Figura 24 se puede observar el contenido de cromo en suelos y cenizas, de estas últimas podría decirse que este elemento, prácticamente, no está presente mientras que en algunos suelos sí, esto se puede deber a que en ellos se forman compuestos más estables a diferencia de las cenizas en donde quizá el cromo lixivía fácilmente, otra razón podría ser que las aguas de riego se encuentran contaminadas con este elemento y por ello hay cromo en los suelos.

De acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 el límite para cromo en suelos agrícolas es de 280 ppm por lo que se puede decir que la concentración en suelos no sobrepasa los límites establecidos.

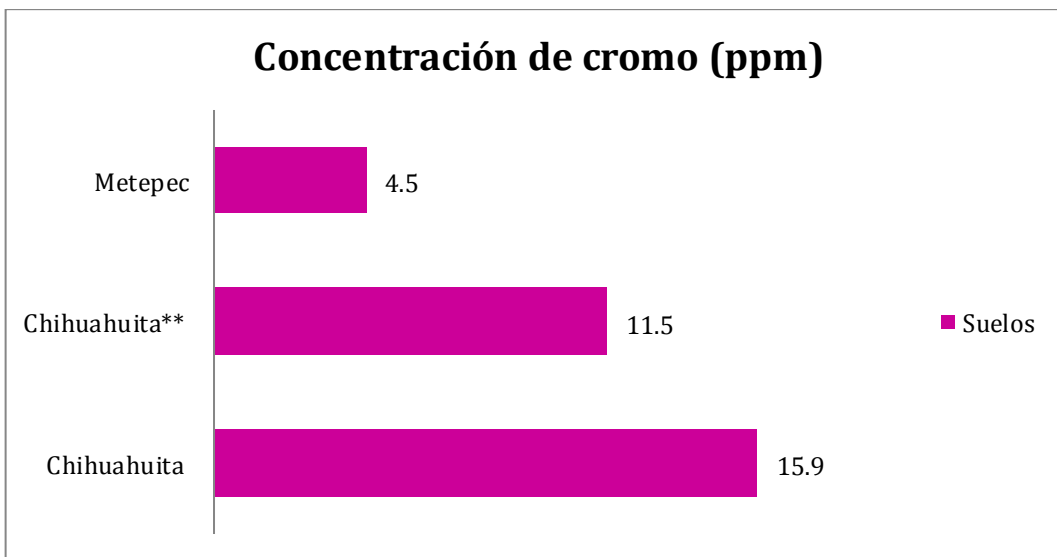


Figura 24. Concentración de cromo en suelos y cenizas. (\*\*)Diferentes fechas de muestreo.

## 5.8. Níquel

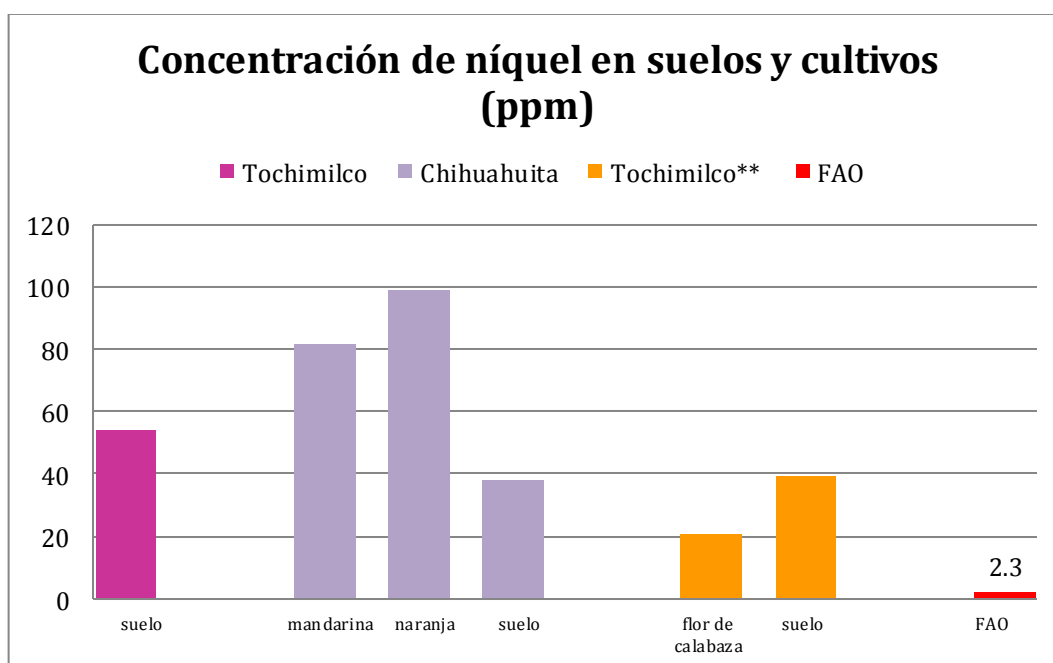
### - Suelos y cultivos

En la Figura 25 se muestra la concentración de níquel en suelos y cultivos. Se puede observar que pocos cultivos son los que lo acumulan (sólo 3 de los 25 analizados), lo cual puede deberse a que se encuentra en formas no disponibles (Palacios *et al.*, 1998) además de que las condiciones de pH no favorecen tal movilidad.

Considerando los valores de pH en cada municipio que presentó níquel no se puede ver una relación entre el comportamiento de los metales en los cultivos y el pH. Para el caso de Tochimilco no se encontraron cultivos que acumularan níquel, el pH de este suelo se considera fuertemente ácido; para el caso de Chihuahuita el suelo presentó pH neutro, los cultivos que absorbieron dicho elemento fueron mandarina y naranja con 81.3 ppm y 98.7 ppm respectivamente y finalmente para el municipio de Tochimilco\*\* sólo la flor de calabaza acumuló níquel, con una concentración de 20.6 ppm, el pH de este suelo se considera moderadamente ácido.

Estudios demuestran que a pH alcalino se favorece la adsorción de níquel por lo tanto hay menor disponibilidad para la planta mientras que en suelos ácidos la adsorción es menor y por lo tanto mayor disponibilidad para la planta (Ramachandran *et al.*, 2013);sin embargo, en este caso el níquel se encuentra, aparentemente, más disponible a pH neutro y sólo en algunos casos a pH moderadamente ácido, la absorción y acumulación tanto en éste como en los otros metales, depende del cultivo y de las formas de níquel que el cultivo puede absorber.

No se encontró norma mexicana que regule el contenido de níquel en los alimentos, por lo que se consultaron los límites que establece la FAO (Kihampa *et al.*, 2011), la cual indica que en vegetales el límite es de 2.3 ppm en peso seco, por lo tanto se puede decir que todos los cultivos con presencia de níquel sobrepasan los límites establecidos y representan un riesgo para la salud.

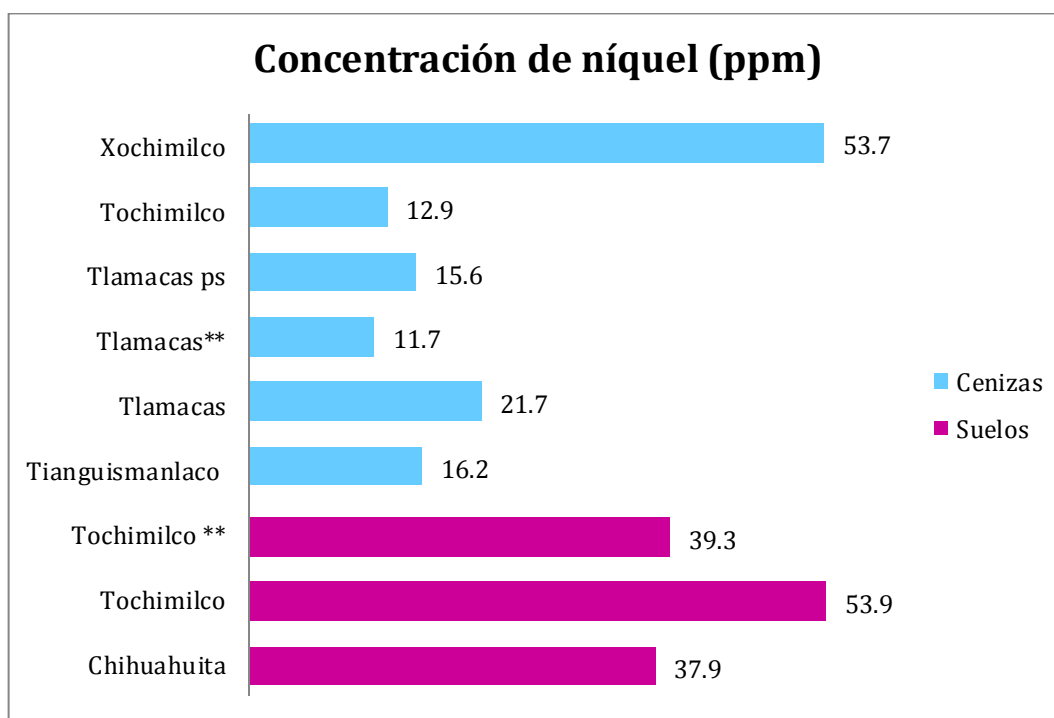


**Figura 25.** Concentración de níquel en suelos y cultivos. (\*\*)Diferentes fechas de muestreo.

- **Suelos y cenizas**

En la Figura 26 se puede observar que para el caso de las cenizas el níquel también está presente en concentraciones cercanas a las que se presentan en los suelos. El pH el cual es un parámetro importante parece no influir en la concentración tanto en suelos como en cenizas.

De acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 el límite para níquel en suelos agrícolas es de 1600 ppm por lo tanto la concentración en suelos no sobrepasa los límites establecidos.



**Figura 26.** Concentración de níquel en suelos y cenizas. (\*\*)Diferentes fechas de muestreo.

## 5.9. Plomo

- **Suelos y cultivos**

En la Figura 27 se muestra el contenido de plomo en suelos y cultivos, ningún cultivo acumuló dicho elemento sólo algunos suelos.

Los suelos que presentaron dicho elemento fueron los de los municipios de Tochimilco\*\*, Paleorío, San Jerónimo y Huexocoapan, casi todos tienen pH moderadamente ácido excepto el último que tiene pH neutro, es posible que bajo estas condiciones de pH el plomo no se encuentre disponible para los cultivos, además la disponibilidad también puede estar dependiendo de la composición del suelo. Solamente 4 de los 8 suelos analizados presentaron dicho elemento pero resultaría interesante investigar si en aquellos suelos con pH fuertemente ácido o alcalino el plomo puede encontrarse en formas disponibles para las plantas.

No se encontró norma mexicana que regule el contenido de plomo en los alimentos, por lo que se consultaron los límites que establece la FAO (Kihampa *et al*, 2011) en vegetales el

límite es de 0.3 ppm en peso seco, por lo que se puede decir que la flor de calabaza representa un riesgo para la salud ya que el plomo rebasa los límites establecidos,

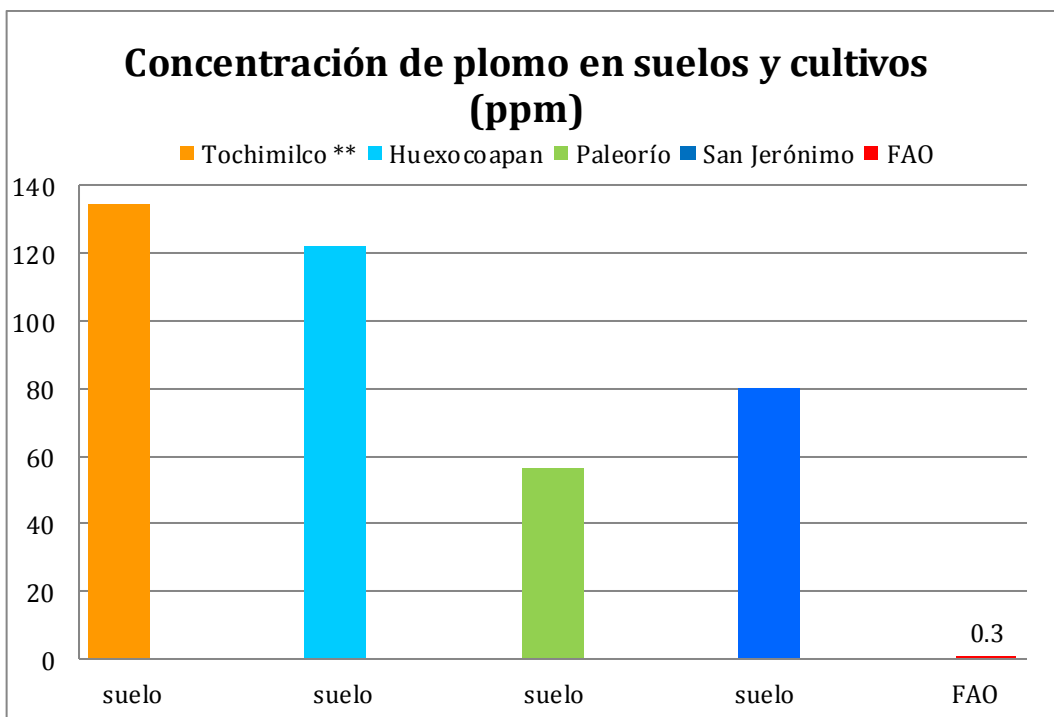
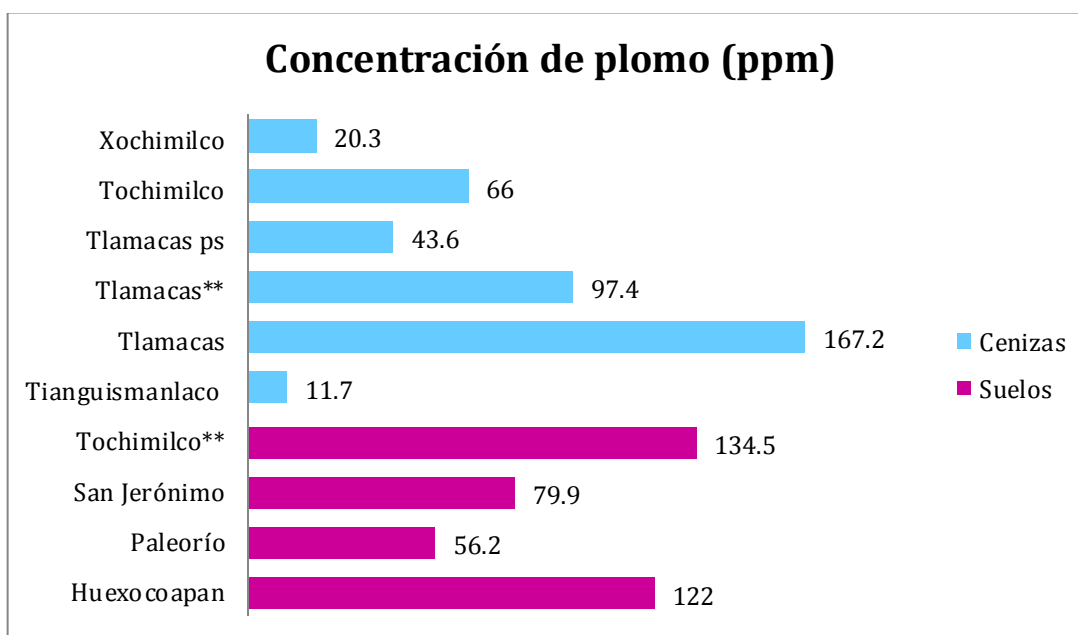


Figura 27. Concentración de plomo en suelos y cultivos.

- **Suelos y cenizas**

En la Figura 28 se presenta el contenido de plomo en suelos y cenizas, en promedio las concentraciones son mayores en suelos por lo que podría decirse que este elemento se fija mejor en ellos, es posible que los compuestos que se forman en los suelos sean más estables y por lo tanto menos lixiviables.

De acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 el límite para plomo en suelos agrícolas es de 400 ppm por lo que la concentración en suelos no sobrepasa los límites establecidos.



**Figura 28.** Concentración de plomo en suelos y cenizas. (\*\*)Diferentes fechas de muestreo.

En la Tabla 10 se muestran los valores de pH en suelos y cenizas, en la Tabla 11 se muestra un resumen de la concentración de sílice, boro y fluoruro de todos los suelos y cenizas analizados, en la Tabla 12 se puede observar la concentración de cadmio, cromo, cobre, níquel y plomo en las cenizas y finalmente en la Tabla 13 se muestran las concentraciones de los mismos elementos que en la tabla anterior para los suelos, cultivos y cultivos control.

**Tabla 10.** pH de suelos y cenizas

	<b>Muestra</b>	<b>pH</b>
Suelos	Chihuahuita	6.54 ±0.01
	Chihuahuita**	6.65 ±0.24
	Huexocoapan	6.66 ±0.04
	Metepec	5.11 ±0.04
	Paleorío	6.51 ±0.11
	San Jerónimo	6.46 ±0.08
	Tochimilco	4.84 ±0.20
	Tochimilco**	5.58 ±0.03
Cenizas	Tianguismanlaco	6.58 ±0.01
	Tlamacas	6.32 ±0.03
	Tlamacas **	5.72 ±0.27
	Tlamacas ps	5.94 ±0.23
	Tochimilco	5.75 ±0.06
	Xochimilco	7.63 ±0.04

**Tabla 11.** Concentración de sílice, boro y fluoruro en suelos y cenizas

	<b>Muestra</b>	<b>Sílice (ppm)</b>	<b>Boro (ppm)</b>	<b>Fluoruro (ppm)</b>
Suelos	Chihuahuita	328.1 ±11.4	62.6	6.8 ±0.4
	Chihuahuita**	299.3 ±9.5	120.1 ±8.7	21.6 ±4.1
	Huexocoapan	188.8 ±8.1	109.5 ±6.9	6.2 ±1.7
	Metepec	74.4 ±1.1	ND	1.1 ±0.2
	Paleorío	98.1 ±5.4	78.1 ±0.3	2.6 ±0.3
	San Jerónimo	59.6 ±6.6	ND	8.6 ±0.3
	Tochimilco	22.2 ±2.5	ND	1.4 ±0.1
	Tochimilco**	265.2 ±5.4	60.7 ±13.6	13.1 ±0.2
Cenizas	Tianguismanalco	53.5 ±3.3	41.2 ±1.4	94.6 ±4.9
	Tlamacas	98.1 ±2.6	ND	9.1 ±1.3
	Tlamacas**	50.0 ±11.5	ND	67.2 ±0.8
	Tlamacas ps	159.2 ±146.2	ND	13.1 ±1.3
	Tochimilco	368.6 ±15.5	ND	55.4 ±7.5



	Xochimilco	73.7 ±3.6	ND	1.1 ±0.0
--	------------	-----------	----	----------

ND: No Detectado

**Tabla 12.** Concentración de cadmio, cromo, cobre, níquel y plomo en cenizas.

Muestra	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb
Tianguismanalco	ND	ND	ND	16.2 ±0.1	ND
Tlamacas	4.0 ±0.4	ND	23.4 ±0.9	ND	167.2 ±5.1
Tlamacas**	2.7 ±0.1	ND	27.2 ±0.4	ND	ND
Tlam ps	1.4 ±0.1	ND	28.0 ±1.3	15.6 ±1.6	43.6 ±4.5
Tochimilco	ND	ND	18.2 ±3.7	12.9 ±0.4	66 ±2.5
Xochimilco	ND	ND	46.5 ±2.8	53.7 ±7.1	20.3 ±4.9

ND: No Detectado

**Tabla 13.** Concentración de cadmio, cromo, cobre, níquel y plomo en suelos y cultivos

Municipio	Muestra	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb
Metepec	Metepec <sup>1</sup>	3.6 ±1.6	4.5 ±1.2	ND	ND	ND
	tejocote	ND	ND	ND	ND	ND
Tochimilco	Tochimilco <sup>1</sup>	ND	ND	ND	53.9 ±9.2	ND
	jícama***	ND	ND	ND	ND	ND
	jícama	ND	ND	ND	ND	ND
Chihuahuita	Chihuahuita <sup>1</sup>	ND	15.9 ±0.8	25.5 ±5.5	37.9 ±2.5	ND
	mandarina	ND	ND	ND	81.3 ±8.1	ND
	lima	ND	ND	ND	ND	ND
	naranja***	ND	ND	ND	ND	ND
	naranja	ND	ND	ND	98.7 ±3.0	ND
	Chihuahuita** <sup>1</sup>	ND	11.5 ±0.4	44.9 ±2.3	ND	ND
	fresa***	ND	ND	ND	ND	ND
San Juan Amecac	fresa	2.1 ±0.3	ND	26.8 ±0.1	ND	ND
	guayaba***	ND	ND	ND	ND	ND
	guayaba	ND	ND	ND	ND	ND
San Fco Huilango	ciruela	ND	ND	ND	ND	ND
	durazno***	ND	ND	ND	ND	ND
	durazno	ND	ND	ND	ND	ND
	chirimoya	3.9 ±0.1	ND	ND	ND	ND
Tochimilco**	guayaba	3.5 ±0.0	ND	ND	ND	ND
	Tochimilco** <sup>1</sup>	4.0 ±0.4	ND	ND	39.3 ±7.4	134.5 ±12.9
	calabaza***	ND	ND	ND	ND	ND
	calabaza	1.0 ±0.1	ND	26.2 ±1.8	ND	ND
	flor de calabaza***	ND	ND	ND	ND	ND
Huexocoapan	flor de calabaza	1.3 ±0.1	ND	ND	20.6 ±1.6	ND
	Huexocoapan <sup>1</sup>	5.4 ±0.1	ND	ND	ND	122.0 ±5.9
	rábano***	ND	ND	ND	ND	ND
Paleorío	rábano	2.7 ±0.1	ND	ND	ND	ND
	Paleorío <sup>1</sup>	ND	ND	ND	ND	56.2 ±5.8
San Jerónimo	chirimoya	1.9 ±0.1	ND	14.0 ±1.1	ND	ND
	San Jerónimo <sup>1</sup>	ND	ND	ND	ND	79.9 ±2.3
	cebolla***	ND	ND	ND	ND	ND
	cebolla	3.8 ±0.5	ND	ND	ND	ND

(<sup>1</sup>)Suelos. (\*\*) Diferentes fechas de muestreo. (\*\*\*) Cultivos control.

## 6. Conclusiones

- ✓ Las concentraciones de sílice encontradas en suelos no sobrepasan los límites establecidos por la Agencia de Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades.
- ✓ No se encontró norma que regule el contenido de boro en suelos agrícolas, 6 de las 8 muestras de suelo presentaron este elemento en concentraciones que van desde 60.7 ppm hasta 120.1 ppm; para el caso de cenizas sólo 2 de las 6 muestras analizadas presentaron boro, 9.6 ppm y 28.6 ppm.
- ✓ En todas las muestras de suelos y cenizas analizadas se encontró fluoruro, la máxima concentración de este elemento fue de 21.6 ppm y 94.6 ppm respectivamente.
- ✓ El cadmio se detectó solamente en 3 de las 6 cenizas y en 3 de los 8 suelos estudiados, 8 de los 25 cultivos muestreados presentaron dicho elemento y todos ellos superan la concentración permitida por la FAO que es de 0.2 ppm. La mayor concentración de cadmio se encontró en chirimoya, cebolla y guayaba, con 3.9 ppm, 3.8 ppm y 3.5 ppm respectivamente; seguido por rábano, fresa y chirimoya con 2.7 ppm, 2.1 ppm y 1.9 ppm respectivamente; los demás cultivos presentaron concentraciones menores de 1.5 ppm.
- ✓ En los suelos el contenido de cadmio se encontró en el intervalo de 3.5 a 5.5 ppm, no sobrepasa los límites establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que es de 37 ppm. En 3 de las 6 cenizas analizadas se encontró este elemento, en concentraciones de 1 a 4 ppm.
- ✓ El cobre se encontró en 3 de los 25 cultivos analizados, fresa, calabaza y chirimoya, la concentración fue de 26.8 ppm, 26.2 ppm y 14 ppm respectivamente; ningún cultivo sobrepasa el límite de 40 ppm establecido por la FAO.
- ✓ Sólo 2 suelos presentaron cobre la concentración fue de 25.5 ppm y 44.9 ppm, no existe norma que regule el contenido de este elemento en los suelos agrícolas; en todas las cenizas analizadas se encontró cobre las concentraciones están entre 16.2 ppm y 46.5 ppm.
- ✓ El cromo no se detectó en ningún cultivo y fue el elemento que se encontró en el menor número de muestras de suelo y cenizas; en suelos el contenido fue de 4.5 ppm a 15.9 ppm no sobrepasa el límite de 37 ppm establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004; en cenizas la concentración de cromo fue de 0.3 ppm.
- ✓ Sólo 3 de los 25 cultivos presentaron níquel, la mayor concentración se observó en naranja y mandarina, con 98.7 ppm y 81.3 ppm respectivamente, seguido por la flor

de calabaza con 20.6 ppm, todos los cultivos sobrepasan el límite de 2.3 ppm establecido por la FAO.

- ✓ En 3 de los 8 suelos se encontró níquel las concentraciones estuvieron entre 37.9 ppm y 53.9 ppm, no sobrepasan el límite establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que es de 1600 ppm.
- ✓ Ningún cultivo presentó plomo. Sólo se encontró en 4 de los 8 suelos muestreados, la concentración fue de 56.2 a 134.5 ppm, la cual no rebasa la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece 400 ppm como límite.
- ✓ No se encontró Norma Mexicana que regule el contenido de cadmio, cobre, cromo níquel y plomo en los alimentos.
- ✓ No existe contaminación de metales pesados (Cd, Cu, Cr, Ni y Pb) debido a la caída de ceniza volcánica en los cultivos provenientes de las zonas cercanas al volcán Popocatepetl.
- ✓ Ningún suelo analizado rebasa los límites de concentración para metales pesados que establece la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.
- ✓ El pH es un factor importante para la movilidad de los metales pesados en el suelo y en los cultivos.
- ✓ Cada cultivo acumula diferentes cantidades de metales pesados a pesar de encontrarse en las mismas condiciones.
- ✓ Los cultivos de tejocote, jícama, durazno, guayaba y ciruela no presentaron contenido de los metales pesados analizados.
- ✓ Los cultivos de fresa, chirimoya y guayaba (de San Francisco Huilango), calabaza, flor de calabaza, rábano y cebolla presentaron cadmio en concentraciones que rebasan los límites establecidos por la FAO.
- ✓ Los cultivos de mandarina, naranja y flor de calabaza presentaron níquel y rebasan los límites establecidos por la FAO.
- ✓ La fresa, la calabaza y la chirimoya (de Paleorío) presentaron cobre; sin embargo, la concentración detectada no sobrepasa los límites establecidos por la FAO.

## 7. Recomendaciones

En virtud de que el CENAPRED desea continuar con la realización de tesis y estudios similares para el análisis de los 15 volcanes activos que se encuentran en el país, de los cuales los de mayor preocupación son el Popocatepetl, el volcán de Colima y el Chichón, se propone lo siguiente:

- Realizar muestreo de cultivos en las diferentes épocas del año para considerar toda la variedad de cultivos que hay en las zonas cercanas al volcán Popocatepetl y determinar en ellos el contenido de metales pesados de ser posible antes y después de caída de ceniza volcánica.
- Realizar estudios de pH y contenido de metales pesados en los suelos de dichas zonas para determinar el comportamiento que tienen los metales pesados, de ser posible antes y después de caída de ceniza volcánica.
- Realizar análisis del contenido de metales pesados en la ceniza volcánica en diferentes épocas del año.
- Muestrear suelos de las zonas cercanas al volcán Popocatepetl y evaluar el comportamiento de los metales a diferentes valores de pH.
- Incluir dentro de algunas materias de la Carrera de Química en Alimentos, técnicas analíticas para la determinación de contaminantes en los alimentos y posibles pruebas toxicológicas encaminadas a evaluar los efectos a la salud por situaciones de contaminación ante eventos de derrames accidentales de sustancias peligrosas en suelos o mala disposición de residuos, entre otros.

## 8. Bibliografía

- 📖 Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentasti, E., Sarzanini, C., Barberis, R. (2002). Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric investigation of pollutant profiles. *Environmental Pollution*, 199 (2): 177-193.
- 📖 Acosta Álvarez, M. (2007). *Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del valle Mezquital, Hidalgo*. Tesis de Licenciatura. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. pp 18, 20, 30, 49.
- 📖 Alloway, B. (1995). *Heavy metals in soils*. 2<sup>nd</sup> Edition. England: Blackie Academic and Professional. pp 323, 398.
- 📖 Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2008).
- 📖 Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., Ivanov, K. (2004). Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). *Industrial Crops and Products*, 19: 197-205
- 📖 Armienta, M., De la Cruz-Reyna, S., Cruz, O., Cenicerros, N., Aguayo, A., Marin, M. (2011). Fluoride in ash leachates: environmental implications at Popocatepetl volcano, Central México. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 11: 1949-1956.
- 📖 Armienta, M., De la Cruz-Reyna, Morton, O., Cruz, O., Cenicerros, N. (2002). Chemical variations of tephra-fall deposit leachates for three eruptions from Popocatepetl volcano. *Journal of Volcanology and Geotherm Res.* 113 (1-2): 61-80
- 📖 Ayala de la Portilla, H. (2007). *Técnica de digestión total de hidrocarburos para análisis de metales pesados*. Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica de Querétaro. pp 47-49.
- 📖 Bohn, H., McNeal, B., O'Connor, G. (1985). *Soil Chemistry*. 2<sup>nd</sup> Edition. Nueva York: Wiley Interscience (341).
- 📖 Burt, R., Wilson, M., Keck, T., Dougherty, B., Strom, D., Lindahl, J. (2003). Trace element speciation in selected smelter-contaminated soils in Anaconda and Deer Lodge Valley, Montana, USA. *Advances in Environmental Research*, 8: 51-67
- 📖 Buteler, M., Stadler, T., López, G., Lassa, M., Trombotto, D., D'Adamo, P., Fernández, V. (2011). Propiedades insecticidas de la ceniza del complejo volcánico Puyehue-Cordón Caulle y su posible impacto ambiental. *Rev. Soc. Entomol. Argent.* 70(3-4): 149-156
- 📖 Caselli, A., Vélez, M.L., Augusto, M.R. (2001). *Manual de procedimientos ante caída de cenizas volcánicas*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. pp 9, 97-99.
- 📖 Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2012). *Informe de actividades 2011*. México: CENAPRED. pp 9 y 10.
- 📖 Chang, A., Granato, T., Page, A. (1992). A methodology for establishing phytotoxicity criteria for chromium, copper, nickel and zinc in agricultural land application of municipal sewage sludges. *J. Environ. Qual.* 21: 521-536.

- 📖 Consejería del Medio Ambiente Junta de Andalucía. (1999). Los criterios y estándares para declarar un suelo contaminado en Andalucía y la metodología y técnicas de toma de muestra y análisis para su investigación. pp 103-108.
- 📖 Corinne, P., Rooney, C., Zhao, F., McGrath, P. (2007). Phytotoxicity of nickel in a range of European soils: Influence of soil properties, Ni solubility and speciation. *Environ. Pollut.* 145 (2): 596-605.
- 📖 Cronin, S.J., y Sharp, D.S. (2002). Environmental on health from continuous volcanic activity at Yasur (Tanna) and Ambrym, Vanuatu. *Int. J. Environ Health Res.* 12: 109-123.
- 📖 De la Cruz-Reyna, S. (2004). *Volcanes, Peligro y Riesgo Volcánico en México*. México: CENAPRED. pp 3-5, 12, 24.
- 📖 Deng, S., Tabatabai. (1995). Cellulase activity of soils: effect of trace elements. *Soil Biol. Biochem.* 27 (7): 977-979. En: Prieto, J., González, C., Román, A., Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 10: 29-44.
- 📖 Diario Oficial de la Unión Europea. (2006). Reglamento CE. 1881/2006 de la Comisión de 19/12/2006, L 364/L 364/24.
- 📖 Diez, J., Kidd, P., Monterroso, C. (2002). Biodisponibilidad de metales en suelos y acumulación en plantas en el área de Tras Os Montes (NE Portugal): Influencia del material original. *Edafología*, 9(3): 313-328.
- 📖 Diez Ortiz, M. (2006). *Valores de fondo de elementos traza en suelos de la provincia de Granada*. Tesis doctoral, Universidad de Granada, España. pp 149.
- 📖 Eaton, A.P., Clesceri, L.S., Rice, E.S., Greenberg, A.E. (2005). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. 21<sup>st</sup> Edition. EUA: Centennial. Método del molibdisilicato 4500-SiO<sub>2</sub> Silica
- 📖 Espinasa-Pereña, R., y Martín-Del Pozzo, A.L. (2006). Morphostratigraphic evolution of Popocatepetl volcano. *Geological Society of America Special Papers*, 402:115-137
- 📖 Fajer, E.D., Bowers, M.D., y Bazzaz, F.A. (1989). The effects of enriched carbon dioxide atmospheres on plant-insect herbivore interactions. *Science*, 243: 1198-1200.
- 📖 Fernández, L.C., Rojas, N.G., Roldán, T.G., Ramírez, M.E., Zegarra, H.G., Uribe, H., Reyes, J., Flores, David, Arce, J.M. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. México: Instituto Mexicano del Petróleo. pp 11, 19-21.
- 📖 Fisher, R.V. (1966). Rocks composed of volcanic fragments and their classification. *Earth-Science Review*, 1: 287-298.
- 📖 Fisher, R.V., y Schmincke, U. (1984). Pyroclastic rocks. *Geological journal*, 20(3): 295-296.
- 📖 Flores, L., Blas, G., Hernández, G., Alcalá, R. (1997). Distribution and sequential extraction of some heavy metals from soils irrigated with wastewater from México City. *Water, air and soil pollution*. 98(1-2): 105-117.

- 📖 García, I., Dorronsoro, C. (2005). Contaminación por Metales Pesados. En Tecnología de Suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. En: Prieto, J., González, C., Román, A., Prieto, F. (2009). pp 30, 31.
- 📖 Gomila, T., Rodríguez, A. (2012). Balance de la cosecha. *Fruticultura*. 67: 22-29
- 📖 Gutiérrez, C.A., Martínez, A., Gómez, A., De la Cruz- Reyna, S., Hernández, T., Mendoza, M.J., Domínguez, L. (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos*. México: CENAPRED. pp 128-131, 134-137, 165-174.
- 📖 Guevara, E., Quaas, R., Ramos, S., Castelán, G., Ortiz, J., Alarcón, A. (2002). Propuesta de instrumentación del volcán el Chichón. *El chichón 1982-2002* : 422
- 📖 Hart, F. (1991). Análisis moderno de los alimentos. Zaragoza: Acribia.
- 📖 Hernández Hernández, A. (2011). *Determinación de metales pesados en suelos de Natividad, Ixtlán de Juárez, Oaxaca*. Tesis de Licenciatura, Universidad de la Sierra Juárez. pp 11-13, 23.
- 📖 Intawongse, M., Dean, J. (2006). Uptake of heavy metals by vegetable plants grown on contaminated soil and their bioavailability in the human gastrointestinal tract. *Food Additives and Contaminants*, 23(1): 36-48
- 📖 Juárez Soto, H.(2006). *Contaminación del río Rímac por metales pesados y efecto en la agricultura en el cono Este de Lima Metropolitana*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú. pp 11, 15, 71.
- 📖 Kabata-Pendias, A. (2001). Trace elements in soils and plants. 3rd Edition. Boca Raton, USA: CRC Press. pp 260-266, 310, 346, 348, 358, 360.
- 📖 Kihampa, C., Mwegoha, W., Shemdoe, R. (2011). Heavy metals concentrations in vegetables grown in the vicinity of the closed dumpsite. *International Journal of environmental sciences*. 2 (2): 889-895
- 📖 Kirk, R., Sawyer, R., Egan, H. (1996). Composición y análisis de alimentos de Pearson. 2da. Edición. México: Continental
- 📖 Laitinen, H.A., Harris, W.E. (1982). *Análisis químico*. Barcelona: Reverté. pp 253
- 📖 Long, X., Yang, X., Ni, W., Ye, Z., He, Z., Calvert, D., Stoffella J. (2007). Assessing zinc thresholds for phytotoxicity and potential dietary toxicity in selected vegetable crops. *Journal of Zhejiang University Science B*. 8(1): 1-13.
- 📖 López, P., Guzmán, F., Santos, E., Prieto, F., Román, A.(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*, 32: 247-253.
- 📖 Lucho, C., Prieto, F., Del Razo L., Rodríguez R., Poggi H. (2005). Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 108: 57-71
- 📖 Mahdy, A., Elkhatib, E., Fathi, N. (2007). Cadmium, copper, nickel and lead availability in biosolids-amended alkaline soils. *Australian Journal of basic and applied sciences*. 1 (4): 354-363

- 📖 Malla, R., Tanaka, Y., Mori, K., Totawat, K. (2007). Effect of short-term sewage irrigation on chemical build up in soils and vegetables. *The Agricultural Engineering International: the CIGR E. Journal*, 9: 1-14
- 📖 Martín del Pozzo A.L., Espinasa-Pereña, R., Armienta, M. A., Aguayo, A., Reyes, M., Sánchez, G., Cruz, O., Cenicerós, J., Lugo J., González, V., Butrón, M. A., y Villarreal, M. (1995). *La emisión de cenizas y variaciones geoquímicas durante diciembre-marzo en el volcán Popocatepetl*. CENAPRED, UNAM: 285-294.
- 📖 Martín del Pozzo, A.L., y Mendiola, F. (2001). Las cenizas volcánicas. *Instituto de Geofísica UNAM*, Agosto:42-48
- 📖 Mentasti, E., y Ramel, C. (1995). Spread of toxic substance and environmental pollution. *Ambio*, 24(4): 250 251
- 📖 Mohammad, H., Sultana, s., Uddin, N., Gomes, R., Noor, S. (2011). Heavy metal levels in vegetables with growth stage and plant species variations. *Bangladesh J. Agril. Res.* 36 (4) : 563 – 574
- 📖 Narváez, O., y Cano, F. (2004). Cenizas volcánicas. *Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias*, 17(3) : 232-238
- 📖 Narwal, R., Singh, B., Selbu, B. (1999). Association of cadmium, zinc, copper and nickel with components in naturally heavy metal rich soils studied by parallel and sequential extraction. *Communications in soil science and plant analysis*, 30(7-8) En: Acosta Álvarez, M. (2007). *Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del valle Mezquital, Hidalgo*. Tesis de Licenciatura. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. pp 20
- 📖 Navarro, J., Aguilar, I., López, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Rev. Ecosistemas*, 16(2): 10-25.
- 📖 Nebel, B., Wright, R. (1999). *Ciencias ambientales: Ecología y desarrollo sostenible*. 6ta Edición. México: Editorial Prentice Hall. En Hernández Hernández, A. (2011). *Determinación de metales pesados en suelos de Natividad, Ixtlán de Juárez, Oaxaca*. Tesis de Licenciatura, Universidad de la Sierra Juárez. pp 9.
- 📖 Nollet, L. (1996). *Handbook of Food Analysis*. Nueva York: M. Dekker.
- 📖 Norma Mexicana. NMX-AA-077-SCFI-2001. Análisis de Aguas. Determinación de fluoruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- 📖 Norma Mexicana. NMX-FF-016-SCFI-2006. Productos alimenticios no industrializados para uso humano-fruta fresca- Aguacate (*Persea americana Mill*) – Especificaciones (Cancela a la NMX-FF-016-SCFI-2002).
- 📖 Norma Mexicana. NMX-FF-021-SCFI-2003. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano- bulbos-cebolla (*Allium Cepa L.*)- Especificaciones (Cancela a la NMX-FF-021-1986)
- 📖 Norma Mexicana. NMX-FF-040-1993. Fruta fresca. Guayaba (*Psidium guajava L.*) Especificaciones.



- 📖 Norma Mexicana. NMX-FF-053-1982. Productos alimenticios no industrializados para uso humano. Hortalizas en estado fresco. Rábano largo.
- 📖 Norma Mexicana. NMX-FF-060-SCFI-2009. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano – Fruta fresca- Durazno y nectarina (*Prunus persica L.*) Batsch – Especificaciones y métodos de prueba (Cancela a la NMX-FF-060- 1993-SCFI).
- 📖 Norma Mexicana. NMX-AA-063-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de boro en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-063-1981).
- 📖 Norma Mexicana. NMX-AA-077-SCFI-2001. Análisis de aguas – Determinación de Fluoruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (Cancela a la NMX-AA-077-1982).
- 📖 Norma Mexicana. NMX-FF-114-SCFI-2009. Grano de amaranto (*Amaranthus spp.*) para uso y consumo humano – Especificaciones y métodos de ensayo.
- 📖 Norma Mexicana. NMX-F-428-1982. Alimentos. Determinación de humedad. (Método rápido de la termobalanza).
- 📖 Norma Oficial Mexicana. NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.
- 📖 Norma Oficial Mexicana. NOM-117-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.
- 📖 Norma Oficial Mexicana. NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.
- 📖 Norma Oficial Mexicana. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- 📖 Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Guía de preparativos de salud frente a erupciones volcánicas*. Quito: Echo. Pp 17-20, 39, 40, 55-57, 59-63.
- 📖 Pagnanelli, F., Moscardni, E., Giuliano, V., Toro, L. (2004). Sequential extraction of heavy metals in river sediments of an abandoned pyrite mining area: pollution detection and affinity series. *Environ Pollut.* 132 (2): 189-201.
- 📖 Palacios, G., Gómez, I., Mataix, J., Guerrero, C. (1998). Disponibilidad de níquel en un suelo fuertemente calcáreo y su incidencia sobre la solubilidad de calcio y magnesio. *Edafología.* 5: 129-134.
- 📖 Plan de contingencias del volcán Popocatepetl. (1995). Gobierno del Estado Libre y Soberano de Puebla, Secretaria de Gobernación y Sistema Estatal de Protección Civil.

- 📖 Plunket, P., y Uruñuela, G. (2008). Mountain of sustenance, mountain of destruction: The prehispanic experience with Popocatepetl Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170: 111-120
- 📖 Prieto, F., Lucho, A., Poggi, H., Álvarez, M., Barrado, E. (2007). Caracterización fisicoquímica 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 Ergo Sum*. 14 (1): 69-80.
- 📖 Prieto, J., González, C., Gutiérrez, R., Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical agroecosystems*. 10:29-44.
- 📖 Prueb, A. (1997). *Action values mobiles (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-extractable) trace elements in soils base on the German national standard DIN 19730. Contaminated Soils*. 3<sup>rd</sup> International. Paris: Conference on the Biochemistry of Trace Elements (415-423).
- 📖 Ramachandran, V., Souza, S. (2013). Adsorption of nickel by indian soils. *Journal of soil science and plant nutrition*. 13 (1): 165-173.
- 📖 Ramos S.G. (2002). Volcán Chichón, aspectos ambientales, a 20 años de su erupción. *El chichón 1982-2002*: 421
- 📖 Rivera-Tapia, A., Yañez, A., y Cedillo, L. (2005). Emisión de ceniza volcánica y sus efectos. *Ecosistemas*, 14(3): 107-115
- 📖 Rivera-Tapia, A., Cedillo, R.L., Gil, J.C., y Giono, C.S. (2003). Efectos de la exposición a la inhalación de ceniza del volcán Popocatepetl en hámsters. *Rev. Universidad y Ciencia* 19: 53-61
- 📖 Rojas, R.M., Noa, O.H., Pérez, N.J., y Villalba, C.J. (1995). Efectos sobre la función pulmonar en personas expuestas a cenizas del volcán Popocatepetl, Diciembre de 1994-Enero de 1995. *Rev.Inst. Nal. Enf. Resp. Mex*. 8: 112-118.
- 📖 Rojas, R.M., Pérez, N.J., Villalba, C.J., Catalán, V.M., Hernández, V.E., Hernández, D.P. (1996). San Nicolás de los Ranchos ¿Un caso representativo de afecciones respiratorias por exposición a cenizas volcánicas? *Rev. Int. Nal. Enf. Resp. Mex*. 9:14-18.
- 📖 Román, A., Prieto, F., Prieto, J., de Ita, S., Méndez, M. (2009). Correlación de potencial zeta y parámetros fisicoquímicos en extractos de saturación de suelos del distrito de riego-03, Valle de Mezquital, Hidalgo, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10: 161-167
- 📖 Romieu, I., Meneses, F., Ruiz, S., Sierna, J., Huerta, J., White, M.C., y Etzel, R.A. (1996). Effects of air pollution on the respiratory health of asthmatic children living in México city. *Am. J. Respir. Crit. Care Med*, 154: 300-307.
- 📖 Rooney, C., Zhao, F., McGrath, S. (2006). Soil factors controlling the expression of copper toxicity to plants in a wide range of European soils. *Environ. Toxicol. Chem*. 25 (3) : 726-732.
- 📖 Sánchez-Rubio, G. (1985). La erupción del 28-29 de Marzo (1982) del volcán Chichonal; un estudio breve de su tefra. *Instituto de Geología UNAM* 6(1): 48-51

- 📖 Schwela, D. (2000). Air pollution and health in urban areas. *Journal of Environ Health*, 15(1-2): 13-42
- 📖 Siebe, C. (1994). Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 10(1): 15-21
- 📖 Siebe, C., Abrams, M., Macías, J.L., y Obenholzner, J. (1996). Repeated volcanic disasters in prehispanic time at Popocatépetl, central Mexico: Past key to the future?. *Geology*, 24(5): 399-402
- 📖 Simkin, T., y Siebert, L. (1994). *Volcanoes of the world*. Arizona: Geoscience Press.
- 📖 Sorokin, Y.I., Sorokin, P.Y., y Zakouskina, O.Y. (2003). Microplankton and its function in a zone of shallow hydrothermal activity: the Craternaya Bay, Kurile Islands. *Journal of Plankton Research*, 25 (5): 495-506.
- 📖 Spain A. (2003). Implications of microbial heavy metal tolerance in the environment. *Reviews in Undergraduate Research*, 2 :1-6
- 📖 Stoiber, R.E., Williams, S.N., Malinconico, L., Johnston, D.A., y Casadevall, T.J. (1981). Mt. St. Helens: Evidence of increased magmatic gas component, *J. of volcanology and geothermal research*, 11 (2-4): 203-212
- 📖 Stevens, D., Mc Laughlin, M., Heinrich, T. (2003). Determining toxicity of lead and zinc runoff in soils: salinity effects on metal partitioning and on phytotoxicity. *Environ. Toxicol. Chem*, 22 (12): 3017-3024
- 📖 Stoiber, R.E., y Williams, S.N. (1990). Monitoring Active volcanoes and mitigating volcanic hazards: the case for including simple approaches. *J. of Volcanology and geothermal research*, 42: 129-149
- 📖 Tavera, H., Antayhua, Y. (2003). *Volcanes y sismicidad en la región del volcán Sabancaya (Arequipa)*. Lima: Instituto Geofísico del Perú. pp 3-8.
- 📖 Vinasco Hernández, C. (2011). *Documentación para la determinación de Ag, As, Cd, Cr, Pb y Hg en aguas residuales, pulpas de frutas y sulfato de aluminio por espectroscopía de absorción atómica en el laboratorio de aguas y alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira. pp 18-21, 34, 35.
- 📖 Vullo, D. (2003). Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. *Rev. Química viva*. 2(3) disponible en: <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/Actualizaciones/metales/metales.htm>
- 📖 Williams S.N., Stoiber, R.E., García, P., Londoño C., Gemmel, J.B., Lowe, D.R., y Connor, C.B. (1986). Eruption of the Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, on 13 November 1985: Gas Flux and Fluid Geochemistry. *Science*, 233: 964-967
- 📖 Wilson, M.R., Stone, V., Cullen, R.T., Searl, A., Maynard, R.L., y Donaldson, K. (2000). In vitro toxicology of respirable Montserrat volcanic ash. *Occup. Environ. Med.* 57: 727-733.
- 📖 Yano, E., Yokoyama, Y., y Nishii, S. (1986). Chronic pulmonary effects of volcanic ash: and epidemiological study. *Arch Environ Health*, 41(2): 94-99.

- 📖 Zagal, E., Sadzawka, A. (2007). *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. Chile: Comisión de Normalización y Acreditación de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo por encargo del Servicio Agrícola y Ganadero. pp 39.
- 📖 Zhao, F., Rooney, C., Zhang, H., McGrath, S. (2006). Comparison of soil solution speciation and diffusive gradients in thin-films measurement as an indicator of copper bioavailability to plants *Environ. Toxicol. Chem.* 25 (3) : 733-742
- 📖 Zhuang, P., Zou, B., Li, N., Li, A. (2009). Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in uangdong, China: implication for human health. *Environ Geochem Health.* 31: 707 – 715.

### Referencias electrónicas

- 📖 Alonso, Oscar. La eduteca. 2013. Fecha última de acceso 3 de Octubre del 2013. <http://laeduteca.blogspot.mx/2011/10/divulgacion-montanas-de-fuego.html>
- 📖 Ayala, Y. Televisa Puebla. 2012. Fecha última de acceso 9 de Septiembre del 2013. <http://www.televisaregional.com/puebla/noticias/154335925.html>
- 📖 Andrés, H. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 2012. Fecha última de acceso 4 de Octubre del 2013. [http://www.buap.mx/portal\\_pprd/wb/comunic/beneficiosa\\_la\\_ceniza\\_volcanica\\_par\\_a\\_suelos\\_y\\_1831](http://www.buap.mx/portal_pprd/wb/comunic/beneficiosa_la_ceniza_volcanica_par_a_suelos_y_1831)
- 📖 Bolaños, A., Pérez, M., Garza, E. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Marzo 2011. Fecha última de acceso 20 de Agosto del 2013. <http://arturobola.tripod.com/silice.htm>
- 📖 Club planeta. Fecha última de acceso 31 de julio del 2013 [http://www.elclima.com.mx/volcan\\_popocatepetl.htm](http://www.elclima.com.mx/volcan_popocatepetl.htm)
- 📖 Fabián Maisanche. Diario El comercio. 2013. Fecha última de acceso 4 de Octubre del 2013. [http://www.elcomercio.com/agromar/maiz-dana-caida-ceniza\\_0\\_833316670.html](http://www.elcomercio.com/agromar/maiz-dana-caida-ceniza_0_833316670.html)
- 📖 González, B. Siglo 21. 2013. Fecha última de acceso 4 de Octubre del 2013 <http://www.s21.com.gt/nacionales/2012/11/29/actividad-volcanica-dana-cultivos-cana-frijol-cafe>
- 📖 Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. 2009. Fecha última de acceso 23 de Octubre del 2013. Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/763-aqre-metales>.
- 📖 Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2012). Volcán Pacaya. Guatemala. disponible en: [http://www.insivumeh.gob.gt/folleto/folleto\\_pacaya.pdf](http://www.insivumeh.gob.gt/folleto/folleto_pacaya.pdf)
- 📖 La patria. 2012. Fecha última de acceso 20 de Agosto del 2013. <http://www.lapatria.com/negocios/incertidumbre-entre-productores-de-frutas-por-efectos-de-la-ceniza-8626>
- 📖 Lenntech, B., (2013). Water Treatment Solutions. Fecha última de acceso 29 de Octubre del 2013. <http://www.lenntech.es/periodica/tabla-periodica.htm>
- 📖 Panamá América Crítica. 2013 Fecha última de acceso 4 de Octubre del 2013. <http://www.critica.com.pa/notas/1327008-cenizas-de-volcan-afecta-los-cultivos>
- 📖 Quero, E. (2008). Silicio en la producción agrícola. Fecha última de acceso 29 de Octubre del 2013

[http://loquequero.com/portal/index.php?option=com\\_content&task=view&id=12&Itemid=2](http://loquequero.com/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=2)

- ☞ The International Volcanic Health Hazard Network. 2013. Fecha última de acceso 11 de Agosto del 2013.  
[http://www.ivhhn.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=101](http://www.ivhhn.org/index.php?option=com_content&view=article&id=101)
- ☞ Universidad Autónoma Metropolitana. Fecha última de acceso 11 Agosto del 2013.  
[http://docencia.izt.uam.mx/sgpe/files/users/uami/mlci/lixiv\\_introd.pdf](http://docencia.izt.uam.mx/sgpe/files/users/uami/mlci/lixiv_introd.pdf)
- ☞ Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.2012-2018. Centro de investigación en gestión de riesgos y cambio climático. Fecha ultima de acceso 20 de Septiembre del 2013. [www.cmvs.chiapas.gob.mx/chichonvol](http://www.cmvs.chiapas.gob.mx/chichonvol)
- ☞ Volcanicash: effects and mitigation strategies.2009. Fecha última de acceso 20 de Septiembre del 2013. <http://volcanoes.usgs.gov/ash/properties.html>
- ☞ <http://www.hoy.com.ec/noticias-ecuador/ceniza-dana-19-mil-ha-de-cultivos-en-cuatro-zonas-412997.html>. Fecha última de acceso 20 de Septiembre del 2013.
- ☞ <http://solnacientenews.blogspot.mx/2012/08/ceniza-del-volcan-tungurahua-sigue.html>. Fecha última de acceso 20 de Septiembre del 2013.
- ☞ <http://detrimentaltsunamiof2004.weebly.com/qa.html>. Fecha última de acceso 3 de Octubre del 2013

### A. Fundamento de metodologías

#### Secado en estufa

Todos los alimentos contienen agua ya sea en mayor o menor proporción. El contenido de agua varía entre un 60 y 95 % en los alimentos naturales. En los tejidos vegetales y animales el agua existe en dos formas generales: agua libre y agua ligada; el agua libre o absorbida, es la forma predominante, se libera con facilidad mientras que el agua ligada se encuentra fuertemente retenida ligada a proteínas y a las moléculas de sacáridos y absorbida sobre la superficie de partículas coloidales (Hart, 1991).

Al realizar un análisis con muestras de diferente naturaleza es importante someterlas a un proceso de secado para disminuir el error que se presenta al tener muestras por tener diferente contenido de humedad y así reportar las muestras en base seca además que este método permite prolongar la vida de la muestra evitando el posible crecimiento de microorganismos.

#### Determinación de humedad

Para valorar el contenido de humedad los métodos de secado son los más comunes, entre el más empleado se encuentra la termobalanza, este método se basa en evaporar de manera continua la humedad de la muestra mediante una lámpara de luz infrarroja y registrar la pérdida de peso hasta que éste se mantenga constante. El error al pesar se minimiza cuando la muestra no se expone constantemente al ambiente (Nollet, 1996; NMX-F-428).

Es importante considerar que algunas veces es difícil eliminar por secado toda la humedad presente y que a cierta temperatura el alimento es susceptible de descomponerse, con lo que se volatilizan otras sustancias además de agua (Kirk *et al.*, 1996).

#### Lixiviación

La lixiviación consiste en la remoción o extracción de un componente soluble (solute) contenido en un sólido mediante un solvente apropiado. Dado que la lixiviación es una operación de transferencia de masa es indispensable que exista un contacto íntimo entre el solvente y el soluto contenido en el sólido (Universidad Autónoma Metropolitana disponible en: <[http://docencia.izt.uam.mx/sgpe/files/users/uami/mlci/lixiv\\_introd.pdf](http://docencia.izt.uam.mx/sgpe/files/users/uami/mlci/lixiv_introd.pdf)> Fecha última de acceso 11 Agosto del 2013).

Las partículas de cenizas volcánicas que contienen compuestos volátiles son capaces de expulsarlos por las fumarolas, cuando esto ocurre los sulfuros, halógenos y otros elementos potencialmente dañinos, se precipitan rápidamente. Estas partículas pueden ser subsecuentemente lixiviadas (por la lluvia), provocando cargas pesadas en suelos y cuerpos de agua. La lixiviación resultante pone en riesgo los medios acuáticos, vegetales y suelos, así como la salud humana (The International Volcanic Health Hazard Network. 2013. <[http://www.ivhhn.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=101](http://www.ivhhn.org/index.php?option=com_content&view=article&id=101)> Fecha última de acceso 11 de Agosto del 2013).

## **Determinación de pH**

El pH es una propiedad química del suelo que tiene efecto importante en el desarrollo de los seres vivos. La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos ( $H^+$ ) que se dan en la interfase líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de los iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El grado de acidez o alcalinidad de un suelo es determinado por medio de un electrodo de vidrio en un contenido de humedad específico o relación suelo-agua, y expresado en términos de escala de pH. Tres son las condiciones posibles de pH en el suelo: la acidez, la neutralidad o la alcalinidad (Fernández et al., 2006).

La ceniza volcánica fresca normalmente disminuye el pH del agua. Los recubrimientos de la superficie de la ceniza volcánica fresca son muy ácidos, debido a la influencia de la pluma de aerosoles integrados por los ácidos minerales fuertes, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico. Por lo tanto, cuando recién la ceniza entra en contacto con el agua, tiene el potencial para reducir el pH más allá de los límites aceptables para el abastecimiento de agua potable o para la protección de la vida acuática (Caselli et al., 2011).

## **Determinación de Sílice**

La determinación se realizó mediante la espectrofotometría de absorción en la región visible. Su relación cuantitativa se basa en la ley de Lambert y Beer, que indica que la absorción de la radiación es proporcional a la concentración de sílice presente.

El dióxido de silicio (sílice) y los fosfatos reaccionan con el ion molibdato en solución ácida, formando un complejo color amarillo de silicomolibdato y fosfomolibdato. Se adiciona ácido oxálico para destruir el fosfomolibdato mientras que el silicomolibdato permanece sin cambios. Finalmente, se adiciona sulfito de sodio que reduce el silicomolibdato a un complejo color azul el cual obedece la ley de Lambert y Beer; la intensidad de color azul se mide a 650 nm por medio de un espectrofotómetro.

Los fosfatos, la turbidez y el color de ciertos iones (cobre, hierro, cromato y taninos) causan interferencias en la determinación (Bolaños, A., Pérez, M., Garza, E. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Marzo 2011. Fecha última de acceso 20 de Agosto del 2013. <<http://arturobola.tripod.com/silice.htm>>).

### ***Reactivos***

**Disolución patrón de 50 ppm de sílice ( $SiO_2$ ).** Se disolvieron 0.0236 g de metasilicato de sodio ( $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ ) en agua destilada (recientemente hervida y enfriada) y se aforaron a 100 mL. La disolución se transvasó a un frasco de plástico con tapa y se almacenó en refrigeración.

## **Determinación de Boro**

Este método determina el boro disuelto y se basa en la medición espectrofotométrica a partir de la formación de un compuesto rojo denominado rosocianina, producido por el boro de la muestra con la curcumina y el ácido clorhídrico.

Con este método sólo se determina boro disuelto, ya que se requiere que las muestras de agua se filtren a través de una membrana de 0,45  $\mu m$  antes del análisis.

El método de la curcumina se aplica para la determinación de boro en un intervalo de concentraciones entre 0,1 mg /L y 1,0 mg /L (NMX-AA-063-SCFI-2001).

### **Reactivos**

**Disolución de curcumina.** Se pesaron 40 mg de curcumina y 5 g de ácido oxálico, se diluyeron en 80 mL de alcohol isopropílico, se adicionaron 4 mL de ácido clorhídrico concentrado y se aforaron a 100 mL en alcohol isopropílico. La disolución es estable por varios días si se mantiene a 4 °C.

**Disolución de HCl.** Se adicionó un volumen de ácido clorhídrico concentrado por cada 19 volúmenes de H<sub>2</sub>O.

**Disolución patrón de boro.** Se pesaron 0.5719 g de ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) (previamente secado en estufa) y se aforó a 100 mL con agua desionizada. Se guardó la disolución en un envase de plástico.

**Disolución intermedia de boro.** Se tomó una alícuota de 1 mL de la disolución patrón de boro con una pipeta volumétrica y se aforó a 100 mL con agua desionizada. Se guardó la disolución en un envase de plástico.

### **Determinación de fluoruro**

Para esta determinación se utilizó un electrodo ion-selectivo el cual tiene una membrana capaz de responder más o menos selectivamente a una sola especie iónica, en contacto por un lado con una disolución del ion a determinar y por el otro, en general, con una disolución que posee una actividad fija de este ion, la cual está en contacto con un electrodo de referencia apropiado (Laitinen *et al.*, 1982).

### **Reactivos**

- Buffer de ajuste de fuerza iónica de fluoruro (ISA)(Marca Beckman)
- Disolución estándar de flúor 1000 ppm (Marca Beckman)
- Disolución intermedia de flúor de 50 ppm

\* Se utilizó un potenciómetro (Boeco Germany pH-meter BT-600) y un electrodo ión selectivo para fluoruro (Beckman).

### **Digestión en horno de microondas**

Este método se basa en la descomposición total de la muestra en condiciones ácidas para obtener una solución que contenga todos los elementos o compuestos de interés sin alterar la cantidad de analito.

La descomposición de muestras orgánicas e inorgánicas mediante microondas presenta grandes ventajas en comparación con métodos convencionales de digestión, algunas de las ventajas son: la rapidez alcanzada en la cinética de la reacción de las muestras con las sustancias de digestión (generalmente ácidos), radiación no ionizante (no causa daños cromosómicos), digestión de muestras de elementos volátiles (Hg, As, Te, Sn, etc) por tratarse de un sistema herméticamente cerrado, reproducible ya que se somete a condiciones semejantes y controladas a todas las muestras, además pueden alcanzarse altas temperaturas



de trabajo. Algunas muestras de difícil digestión, que antes necesitaban horas para descomponerse completamente, pueden digerirse en el horno de microondas en pocos minutos (Ayala de la Portilla, 2007).

### **Determinación de cadmio, cobre, cromo, níquel y plomo por Espectrofotometría de Absorción Atómica.**

En la Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) con llama (aspiración directa) una fracción de muestra previamente digerida es aspirada, pasa por el nebulizador (sistema que convierte la muestra líquida en niebla o aerosol), entra en el quemador y, a medida que las finas gotas de aerosol se calientan se van evaporando dejando pequeñas partículas sólidas que se atomizan dentro de una llama de aire-acetileno u óxido nitroso-acetileno, una lámpara de cátodo hueco o lámpara de descarga emite radiaciones de la longitud de onda apropiada para que sean absorbidas por un elemento de la muestra que ha sido atomizada en la llama, se dirige hacia el monocromador el cual selecciona la radiación de la longitud de onda (característica de cada elemento) que llega al detector, encargado de cuantificar y registrar la intensidad de luz que recibe, comparándola con la intensidad emitida por la fuente y transformándola en absorbancia o transmitancia. La concentración del elemento es proporcional a la señal por lo que a partir de la ley de Lambert y Beer es posible calcularla.

La técnica es simple, rápida y aplicable a un gran número de elementos. Aunque se han informado métodos para el análisis de sólidos, está generalmente limitada a elementos en solución. Por lo tanto, para el análisis de metales totales en lodos y suelos se requiere una digestión previa de la muestra.

Los límites de detección, la sensibilidad y los rangos óptimos para el análisis de los metales varían con las matrices y con los modelos de los espectrofotómetros de absorción atómica. Los límites de detección pueden disminuirse usando la técnica del horno de grafito o aumentarse usando una longitud de onda menos sensible o por rotación del mechero. Los límites de detección deben establecerse empíricamente para cada tipo de matriz analizada.

Pueden usarse, además del horno de grafito, procedimientos especiales como el método de la generación de hidruros para arsénico y selenio y la técnica del vapor frío para mercurio (Zagal et al., 2007).

## B. Campo de muestreo

En las siguientes fotografías se pueden observar los campos de cultivo de los municipios muestreados así como también el cultivo recolectado.



**Figura 29.** Lima (Chihuahuita)



**Figura 30.** Campos de cultivo de calabaza (Tochimilco)



**Figura 31.** Calabaza recolectada (Tochimilco)



**Figura 32.** Flor de calabaza (Tochimilco)

### **C. Muestras**

En las siguientes fotografías se pueden observar los cultivos frescos, es decir, sin ningún tipo de tratamiento y por otro lado el cultivo rebanado y seco.



**Figura 33.** Chirimoya recolectada (izquierda). Chirimoya después de la deshidratación (derecha) (San Francisco Huilango).





**Figura 34.** Durazno recolectado (izquierda). Durazno rebanado después de secarlo en estufa (derecha) (San Francisco Huilango).



**Figura 35.** Guayaba antes de cualquier tratamiento (izquierda). Guayaba después de secarla en estufa (derecha) (San Francisco Huilango).



**Figura 36.** Calabaza recolectada (izquierda). Calabaza rebanada después de secarla en estufa (derecha) (Tochimilco).



**Figura 37.** Flor de calabaza deshidratada (Tochimilco)



**Figura 38.** Rábano recolectado y después de secarlo en estufa (izquierda y derecha respectivamente) (Huexocoapan)



**Figura 39.** Chirimoya (Paleorío).





**Figura 40.** Cebolla recolectada (izquierda). Cebolla rebanada después de secarla en estufa (derecha) (San Jerónimo Tecuanipan).

## D. Porcentaje de humedad en suelos y cenizas

Tabla 14. Porcentaje de humedad de suelos

Muestra	% Humedad
Axocopan	29.9 ±3.31
Chihuahuita	3.5 ±0.24
Chihuahuita**	12.1 ±2.03
Huexocoapan	6.7 ±0.97
Metepéc	1.0 ±0.22
Paleorío	11.1 ±0.01
San Jerónimo	5.7 ±0.26
Tochimilco	0.9 ±0.11
Tochimilco**	1.8 ±0.17

## E. Cálculo

Se muestran de forma general los cálculos para conocer la concentración de cada uno de los elementos medidos.

A partir de la absorbancia medida en el equipo y mediante la ecuación obtenida de regresión lineal de la curva patrón es posible conocer la concentración de la muestra realizando una interpolación:

$$y = mx + b; x = \frac{y - b}{m}$$

Donde:

x= concentración obtenida del equipo

y=absorbancia obtenida

b=ordenada al origen

m=pendiente

Para conocer la concentración final de la muestra se deben considerar las diluciones y el peso de la muestra:

$$\text{volumen de aforo} \frac{x}{\text{peso de la muestra}} = \text{concentración final del elemento}$$

## **F. Recomendaciones ante caída de ceniza volcánica**

Con el desarrollo del presente proyecto fue posible dar validez a las recomendaciones que realizan las diferentes dependencias con el fin de prevenir y proteger a la población que se encuentra en riesgo ante presencia de ceniza volcánica en su comunidad.

Las siguientes recomendaciones se dividen en: protección de la salud de las personas, actividades de limpieza en las viviendas y la comunidad y protección de los animales.

### **Recomendaciones personales**

- Proteger ojos, nariz y boca, si tenemos necesidad de salir a la intemperie.
- Se recomienda cubrir nariz y boca con un pañuelo, trapo o cubre bocas o el uso de mascarillas de protección.
- Si es posible, mantenerse en el interior de su casa, oficina, edificios o bien en su automóvil hasta que la contingencia haya pasado.
- Usar lentes, camisas y blusas de manga larga en caso de salir al exterior, ya que la ceniza afecta la visibilidad y puede dañar la piel. De preferencia no usar lentes de contacto.
- Si se ha estado expuesto a la ceniza y se presenta sensación de cuerpo extraño en los ojos, lavar los ojos con abundante agua. Es preferible utilizar agua potable y hervida, así como lavarse las manos antes del procedimiento. No utilizar colirios o gotas oftalmológicas. Si la sensación de cuerpo extraño persiste luego del lavado es necesario acudir al médico.
- Evitar hacer ejercicio al aire libre.

### **Recomendaciones para la vivienda y la comunidad**

- Cerrar puertas y ventanas y sellar con trapos húmedos las rendijas y las ventilas, para limitar la entrada de polvo a casas y edificios.
- Colóquese una mascarilla o pañuelo mojado antes de iniciar labores de limpieza de su casa. Si la caída de cenizas ha terminado abra las ventanas para tener una buena ventilación durante la limpieza.
- Sacudir la ceniza con plumeros o utilice un trapo húmedo para que no se rayen las superficies, evite frotarlas con fuerza.
- Tapar tinacos, cisternas, piletas y otros depósitos de agua para evitar que las cenizas contaminen el agua. Tener cuidado especial en tapar los recipientes en los que se conserve agua para beber y preparar alimentos.
- Si caen cenizas dentro del agua debe evitarse beberla o utilizarla en la preparación de alimentos, porque las cenizas pueden contaminar el agua. En caso de que el agua no muestre turbidez, puede usarse para bañarse o para actividades de limpieza.
- Puede consumir frutas y vegetales de su huerta siempre y cuando los lave previamente para retirar totalmente la ceniza que pudo haberles caído.



- Cubrir aparatos, equipos y automóviles para que no se deterioren ni rayen.
- Si la lluvia de ceniza es fuerte y constante, quitar las cenizas para evitar que se acumulen en techos ligeros (lámina, cartón, lona y otros parecidos), ya que pueden hacer que se caigan por el exceso de peso. Limpiar también los ductos de ventilación.
- Tenga cuidado al subir por escaleras y a tejados o techos porque la ceniza volcánica es resbaladiza
- Recoger con el uso de una pala o escoba y recogedor las cenizas que se acumulen en los techos, suelos y calles para que no se tape el drenaje, y coloque las cenizas en costales o bolsas de plástico. Los drenajes no se deben limpiar con agua para evitar que se obstruyan.
- Cubrir coladeras de patios y azoteas para evitar que se tape el drenaje.
- Evitar el uso de automóviles y en caso de usarlo, sea precavido y paciente, porque el tráfico se puede volver lento al ponerse resbaloso el piso y puede disminuir la visibilidad. Las cenizas se levantan con el paso de los vehículos.
- Si la lluvia de ceniza es fuerte y constante, es necesario limpiar con frecuencia techos y ductos de ventilación y mantener cerradas puertas y ventanas.
- Para limpiar el automóvil, primero hay que quitar el exceso de ceniza con una escobilla o cepillo de cerda suave y luego limpiar con mucha agua, procurando sacar la ceniza de todas las hendiduras. La ceniza debe recolectarse preferentemente seca.
- Para mantenerse bien informado, buscar información confiable, no creer ni repetir rumores.

### **Recomendaciones para el cuidado de los animales**

- No dejar a la intemperie alimentos concentrados, pajas o henos, cubrirlos con lonas, plásticos, sacos u otro material, para evitar la incorporación de ceniza en éstos.
- Tapar los pozos para mantener el agua sin contaminación.
- Conservar cubiertos los bebederos y comederos cuando no sean utilizados, lavarlos antes y después de su uso.
- Controlar el suministro de alimento y agua para beber, dando a los animales las cantidades solo a consumir, evitando dejar restos en los comederos y bebederos para evitar que se contaminen con las cenizas.
- A los animales de corral (aves, cerdos, ovinos y caprinos) y de compañía (gatos y perros) evitar en lo posible dejarlos a la intemperie durante la caída de ceniza.