



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LA
BIODISPONIBILIDAD DE METALES EN EL AGUA DE LOS
CANALES DE XOCHIMILCO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO**

PRESENTA

GIOVANNI ALDANA GUTIÉRREZ

DIRECTOR DE TESIS

D. CLAUDIA A. PONCE DE LEÓN HILL



Ciudad Universitaria, Cd. Mex.

2016



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: Lena Ruíz Azuara
VOCAL: Profesor: José de Jesús García Valdés
SECRETARIO: Profesor: Claudia A. Ponce de León Hill
1er. SUPLENTE: Profesor: Héctor Ariel Rico Morales
2° SUPLENTE: Profesor: Adrián Espinoza Guillen

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: UNIDAD DE ANÁLISIS AMBIENTAL.
EDIFICIO TLAHUIZCALPAN; FACULTAD DE CIENCIAS. UNAM**

ASESOR DEL TEMA:

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dra. Claudia A. Ponce de León Hill

M. en C. Manuel Hernández Quiroz

SUSTENTANTE:

Giovanni Aldana Gutiérrez

Agradecimientos

A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México por darme todo lo que he necesitado para desarrollarme académicamente, profesionalmente y humanamente en mi vida (ENP 5, Facultad de Química y la Facultad de Ciencias).

A la Dra. Claudia Ponce de León Hill, por todo lo que me dio a lo largo de los tres años en los que pude trabajar con ella, su amistad, su apoyo, su comprensión y la oportunidad que me brindó para formar parte de su equipo trabajo, además del excelente ambiente de trabajo del que pasamos muchos momentos.

Al M. en C. Manuel Hernández Quiroz, por todo lo que me brindó a lo largo de los tres años en los que pude trabajar con él, su apoyo para realizar los trabajos, el excelente ambiente de trabajo que formamos, por su amistad y por todo lo que aprendí de él, además del gusto por los cactus que me inculcó y los que me regaló.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT por el apoyo económico otorgado a la realización de este trabajo siendo parte del proyecto nombrado: "Efecto de las características del suelo sobre la disponibilidad de metales y su absorción en un cultivo urbano". No. IN104614.

A la Dra. Silke Cram del Instituto de Geografía, por su amistad y su apoyo al otorgarme una Beca para la realización del presente trabajo.

Al M. en C. Sebastián Zúñiga del Laboratorio de Ecotoxicología de la Facultad de Ciencias, por su amistad y su apoyo en la realización de la parte estadística para la conclusión del presente trabajo.

A la Dra. Ofelia Morton del Instituto de Geología, por las facilidades para el procesamiento y lectura de muestras.

A la Dra. Lucy Mora del Instituto de Geología, por la facilidad en la obtención del programa Minteq.

A todo el equipo que integra la Unidad de Análisis Ambiental en la Facultad de Ciencias, en donde trabajé durante tres años y sentí como una segunda casa.

Índice

RESUMEN	1
Capítulo 1. Marco Teórico.	3
1.1. Características de la zona de estudio.	3
1.2. Zona lacustre del lago de Xochimilco.	5
1.2.1. Hidrografía.	5
1.2.2. Orografía.	7
1.3. Características de los humedales.	10
1.4. Efecto de las aguas de plantas de tratamiento.	12
1.4.1. Ventajas y desventajas del uso de aguas residuales.	13
1.5. Sustancias contaminantes.	15
1.5.1. Origen de las sustancias contaminantes.	16
1.5.2. Tipo de contaminantes.	17
1.5.3. Propiedades de los contaminantes.	18
1.5.3.1. Metales pesados.	18
1.5.3.2. Compuestos orgánicos persistentes (COP).	20
1.5.3.3. Sustancias eutrofizantes (NO _x).	21
1.5.3.4. Plaguicidas.	22
1.6. Metales pesados en aguas residuales.	24
1.6.1. Efecto de los metales pesados contenidos en aguas residuales.	24
1.6.2. Contaminación del suelo.	25
1.6.3. Contaminación por actividad agrícola.	26
1.6.4. Comportamiento de los metales pesados en el ambiente.	27
1.7. Origen y propiedades fisicoquímicas de los metales geogénicos, antropogénicos y macronutrientes.	28
1.7.1. Metales Geogénicos.	28
1.7.1.1. Vanadio (²³ V).	28
1.7.1.2. Cobalto (²⁷ Co).	28
1.7.1.3. Cobre (²⁹ Cu).	29

1.7.2. Metales Antropogénicos.	29
1.7.2.1. Cromo ($_{24}\text{Cr}$).	29
1.7.2.2. Níquel ($_{28}\text{Ni}$).	30
1.7.2.3. Cadmio ($_{48}\text{Cd}$).	30
1.7.2.4. Plomo ($_{82}\text{Pb}$).	31
1.7.3. Macronutrientes.	32
1.7.3.1. Manganeso ($_{25}\text{Mn}$).	32
1.7.3.2. Hierro ($_{26}\text{Fe}$).	33
1.7.3.3. Zinc ($_{30}\text{Zn}$).	33
1.8. Modelos matemáticos de equilibrio químico de metales.	35
1.9. Toxicidad de metales.	40
Capítulo 2. Objetivos.	41
2.1. Objetivo General.	41
2.1.1. Objetivos Particulares.	41
2.2. Hipótesis.	41
Capítulo 3. Procedimiento Experimental.	42
3.1. Descripción de los sitios de muestreo.	42
3.2. Determinación de los parámetros fisicoquímicos de la zona de estudio.	47
3.3. Procedimientos de muestreo de agua.	48
3.4. Procesamiento de muestras en el laboratorio.	49
3.4.1. Determinación de la concentración de metales totales en la columna de agua.	49
3.4.2. Determinación de parámetros para el uso de los modelos de equilibrio químico.	54
	60

Capítulo 4. Resultados y Discusión.	
4.1. Caracterización de las zonas de estudio.	60
4.2. Parámetros para los modelos matemáticos de equilibrio químico de metales.	68
4.2.1. Concentración de metales totales (agua + PS).	68
4.2.2. Concentración de metales en agua filtrada a 0.22µm (fase coloidal).	69
4.2.3. Concentración de aniones y cationes en agua filtrada (sin PS).	70
4.2.4. Concentración de sustancias húmicas disueltas.	72
4.3. Estudio comparativo con los modelos matemáticos de equilibrio químico de metales.	74
Capítulo 5. Distribución de las especies químicas de los metales en agua de los canales de Xochimilco.	81
5.1. Distribución Espacial de la concentración total (agua + PS) de los metales.	81
5.2. Distribución de las especies químicas de los metales en la columna de agua determinado con WHAM.	85
Capítulo 6. Conclusiones.	98
Capítulo 7. Bibliografía.	100
7.1. Bibliografía Complementaria.	106
Capítulo 8. ANEXOS	107
8.1. Anexo I	107
8.2. Anexo II	108
8.3. Anexo III	110
8.4. Anexo IV	112
8.5. Anexo V	118
8.6. Anexo VI	138

Índice de Figuras.

Capítulo 1	3
Figura 1.0. Imagen de la Antigua Cuenca del Valle de México.	6
Figura 1.1. Mapa de la antigua Cuenca de México.	8
Figura 1.2. Mapa actual de la Cuenca de México.	9
Figura 1.3. Ciclo biogeoquímico de los metales en las esferas ambientales.	16
Figura 1.4. Matrices en las que el metal se encuentra en el agua.	19
Figura 1.5. Movilización de metales pesados en el suelo.	25
Figura 1.6. Camino de los metales pesados a través de los ciclos biológicos.	27
Figura 1.7. Fuentes de exposición del ser humano al Cadmio.	31
Figura 1.8. Esquema de factores existentes en competencia por los iones metálicos.	36
Figura 1.9. Vista conceptual de un sistema en solución mostrado por WHAM.	37
Figura 1.10. Equilibrios químicos considerados en WHAM.	38
Figura 1.11. Menú principal del Visual MINTEQ.	39
Capítulo 3	42
Figura 3.0. Mapa de la zona de Xochimilco.	42
Figura 3.1. Cultivo de nopales.	43
Figura 3.2. Canal de Ampampilco.	43
Figura 3.3. Canal de Ampampilco.	43
Figura 3.4. Canal de Apatlaco.	44
Figura 3.5. Campos de cultivo.	44
Figura 3.6. Presencia de invernaderos.	44
Figura 3.7. Laguna de Asunción.	45

Figura 3.8. Laguna de Asunción cubierta de lirio.	45
Figura 3.9. Canal del Infiernito (Entrada a la Laguna de Asunción).	45
Figura 3.10. Canal de la Draga.	46
Figura 3.11. Zona de pastos.	46
Figura 3.12. Salida de agua proveniente de la planta de tratamiento.	46
Figura 3.13. Multiparámetro Hanna HI9829.	47
Figura 3.14. Botella Van Dorn.	48
Figura 3.15. Vaciado de agua en botellas ámbar.	48
Figura 3.16. Almacenamiento en hielo a 4 °C.	48
Figura 3.17. Vacutainer 10 mL y membranas nitrocelulosa de 0.45µm.	49
Figura 3.18. Sistema de filtración para laboratorio.	50
Figura 3.19. Botellas de polietileno y membranas de polisulfona de 0.22µm.	50
Figura 3.20. Vista frontal del ICP-MS (iCAP Q MS).	51
Figura 3.21. Bomba peristáltica con la muestra y el tubo de desechos.	52
Figura 3.22. Tubos de teflón y Horno de Microondas (CEM MAR SX).	52
Figura 3.23. Equipo de Absorción Atómica (AA).	53
Figura 3.24. Representación esquemática para la determinación de AH, AF y Hy para muestras de agua y suelos/sedimentos.	57
Capítulo 4	63
Figura 4.0. Comparación de pH de los sitios de muestreo.	63
Figura 4.1. Comparación de conductividad de los sitios de muestreo.	63
Figura 4.2. Comparación de la temperatura en los sitios de muestreo.	64
Figura 4.3. Comparación de la concentración del oxígeno disuelto en los sitios de muestreo.	64
Figura 4.4. Análisis Blox Plot de los valores calculados de SUVA ₂₅₄ en las muestras de agua de los canales de Xochimilco.	67

Figura 4.5. Correlación entre los tres modelos.	75
Figura 4.6. Diagrama conceptual del Modelo BLM de Pagenkopf en 1983.	78
Figura 4.7. Diagrama esquemático de un modelo de equilibrio químico para la especiación de metales de Tipping en 1996.	80
Capítulo 5	81
Figura 5.0. Distribución espacial de metales antropogénicos en el agua de los canales de Xochimilco.	82
Figura 5.1. Distribución espacial de metales geogénicos en el agua de los canales de Xochimilco.	83
Figura 5.2. Distribución espacial de macronutrientes en el agua de los canales de Xochimilco.	84
Figura 5.3. Concentración de metales en agua + PS presentes en los diferentes canales de Xochimilco.	86
Figura 5.4. Comparación de la concentración de metales presentes en partículas suspendidas (PS).	88
Figura 5.5. Distribución espacial de iones metálicos en el agua del canal de Ampampilco.	89
Figura 5.6. Distribución espacial de iones metálicos en el agua del canal de Apatlaco.	90
Figura 5.7. Distribución espacial de iones metálicos en el agua del canal de Asunción.	91
Figura 5.8. Distribución espacial de iones metálicos en el agua del canal de la Draga.	92
Figura 5.9. Concentración del ión libre (biodisponible) de metales de origen antropogénico.	94
Figura 5.10. Concentración del ión libre (biodisponible) de metales de origen geogénico.	94
Figura 5.11. Concentración del ión libre (biodisponible) de metales de macronutrientes.	95
Figura 5.12. Porción del ión libre (biodisponible) presente en los diferentes canales de Xochimilco.	95
Figura 5.13. Relación de la concentración de PS y MO.	96

Capítulo 8	107
Figura 8.0. Mapa de los sitios muestreados en la zona de Xochimilco.	107
Figura 8.1. Concentración de metales en partículas suspendidas.	138
Figura 8.2. Concentración de metales en PS estimado por WHAM.	139

Índice de Tablas

Capítulo 4	60
Tabla 4.0. Descripción de los sitios de muestreo.	61
Tabla 4.1. Descripción de los parámetros fisicoquímicos de los sitios de muestreo.	62
Tabla 4.2. Determinación de SUVA ₂₅₄	66
Tabla 4.3. Contenido de metales totales agua + PS de los canales de Xochimilco.	68
Tabla 4.4. Contenido de metales en fase coloidal de los canales de Xochimilco.	69
Tabla 4.5. Concentración de cationes.	70
Tabla 4.6. Concentración de aniones.	71
Tabla 4.7. Concentración de sustancias húmicas.	72
Tabla 4.8. Correlación entre los tres modelos.	75
Tabla 4.9. Comparación de características de modelos de equilibrio químico seleccionado para la especiación de metales.	76
Tabla 4.10. Comparación de resultados obtenidos de cada uno de los tres modelos.	77
Capítulo 5	81
Tabla 5.0. Límites Máximos Permisibles para metales pesados y cianuros.	86
Tabla 5.1. Concentración promedio de metales (mgL ⁻¹) en diferentes organismos acuáticos.	97
Capítulo 8	107
Tabla 8.0. Porcentaje de Humedad determinado de la resina DAX-8.	111
Tabla 8.1. Concentración total de iones metálicos presentes en el agua del canal de Ampampilco.	118
Tabla 8.2. Concentración de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Ampampilco.	118

Tabla 8.3. Concentración de metales asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de Ampampilco.	119
Tabla 8.4. Concentración de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Ampampilco.	119
Tabla 8.5. Concentración de metal asociado a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Ampampilco.	120
Tabla 8.6. Distribución porcentual de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Ampampilco.	120
Tabla 8.7. Distribución porcentual de iones metálicos asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de Ampampilco.	121
Tabla 8.8. Distribución porcentual de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Ampampilco.	121
Tabla 8.9. Concentración y distribución porcentual de Hierro en forma precipitada presente en el agua del canal de Ampampilco.	122
Tabla 8.10. Distribución porcentual de metales asociados a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Ampampilco.	122
Tabla 8.11. Distribución porcentual promedio de iones metálicos presentes en el agua del canal de Ampampilco.	122
Tabla 8.12. Concentración total de iones metálicos presentes en el agua del canal de Apatlaco.	123
Tabla 8.13. Concentración de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Apatlaco.	123
Tabla 8.14. Concentración de metales asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de Apatlaco.	124
Tabla 8.15. Concentración de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Apatlaco.	124
Tabla 8.16. Concentración de metal asociado a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Apatlaco.	125
Tabla 8.17. Distribución porcentual de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Apatlaco.	125
Tabla 8.18. Distribución porcentual de iones metálicos asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal Apatlaco.	126

Tabla 8.19. Distribución porcentual de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Apatlaco.	126
Tabla 8.20. Concentración y distribución porcentual de Hierro en forma precipitada presente en el agua del canal de Apatlaco, c= concentración en mgL^{-1} , P= porcentaje %.	127
Tabla 8.21. Distribución porcentual de metales asociados a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Apatlaco.	127
Tabla 8.22. Distribución porcentual promedio de iones metálicos presentes en el agua del canal de Apatlaco.	127
Tabla 8.23. Concentración total de iones metálicos presentes en el agua del canal de Asunción.	128
Tabla 8.24. Concentración de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Asunción.	128
Tabla 8.25. Concentración de metales asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de Asunción.	129
Tabla 8.26. Concentración de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Asunción.	129
Tabla 8.27. Concentración de metal asociado a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Asunción.	130
Tabla 8.28. Distribución porcentual de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Asunción.	130
Tabla 8.29. Distribución porcentual de iones metálicos asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de Asunción.	131
Tabla 8.30. Distribución porcentual de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Asunción.	131
Tabla 8.31. Concentración y distribución porcentual de Hierro en forma precipitada presente en el agua del canal de Asunción, c= concentración en mgL^{-1} , P= porcentaje %.	132
Tabla 8.32. Distribución porcentual de metales asociados a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Asunción.	132
Tabla 8.33. Distribución porcentual promedio de iones metálicos presentes en el agua del canal de Asunción.	132

Tabla 8.34. Concentración total de iones metálicos presentes en el agua del canal de La Draga.	133
Tabla 8.35. Concentración de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal La Draga.	133
Tabla 8.36. Concentración de metales asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de La Draga.	134
Tabla 8.37. Concentración de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de La Draga.	134
Tabla 8.38. Concentración de metal asociado a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de La Draga.	135
Tabla 8.39. Distribución porcentual de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de La Draga.	135
Tabla 8.40. Distribución porcentual de iones metálicos asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de La Draga.	136
Tabla 8.41. Distribución porcentual de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de La Draga.	136
Tabla 8.42. Concentración y distribución porcentual de Hierro en forma precipitada presente en el agua del canal de La Draga, c= concentración en mgL^{-1} , P= porcentaje %.	137
Tabla 8.43. Distribución porcentual de metales asociados a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de La Draga.	137
Tabla 8.44. Distribución porcentual promedio de iones metálicos presentes en el agua del canal de La Draga.	137

RESUMEN.

Los canales de la zona lacustre de Xochimilco, desde los años cincuenta, reciben agua proveniente de las plantas de tratamiento, líquido que, por su calidad produce problemas de contaminación que afectan a esta importante región de la Cuenca de México. Esta agua es una mezcla de las corrientes producidas en la industria y los hogares de la Ciudad de México. La presencia de esta agua ha afectado la flora y la fauna, tanto de los canales como de las propias chinampas, y representa un peligro para la población local, en principio, por sustancias organolépticas como manganeso, detergentes, aceites, grasas, minerales y fenoles; por sustancias tóxicas como el cianuro, arsénico, plomo, mercurio y sustancias de riesgo potencial como el antimonio, bario, cobalto y níquel.

De acuerdo a lo anterior, se puede decir que existe contaminación cuando determinadas sustancias alcanzan concentraciones que puede medirse por sus efectos en el hombre, los animales, los vegetales, el suelo y en el mismo sistema atmosférico. Este es el caso de las aguas residuales que llegan a los canales y que se incorporan al suelo, aportando metales pesados, microelementos y otras sustancias. En el presente trabajo se puso especial atención sobre la distribución espacial y su posible potencial toxicológico de los siguientes elementos: Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn y V.

Los metales en aguas naturales pocas veces se encuentran como pertenecientes a una de varias categorías, por ejemplo, metal disuelto, en fase coloidal o fase particulada. Más bien se producen como intermedios entre ellas o mezclas de estas categorías, dependiendo de una variedad de factores biológicos físicos y químicos. Pero en la mayoría de los casos, todavía se determinan sólo las concentraciones totales, lo que significa la suma de todas estas fases que actúan de manera diferente. Por otra parte, hay que tener en cuenta que todas las mediciones en campo o en el laboratorio son sólo una imagen instantánea de la realidad dinámica que rige la compleja interacción entre los metales y el ambiente.

Se realizaron análisis de concentración total de metales, aromaticidad por UV-Visible y se determinó la composición de la materia orgánica por medio de la implementación de un método de extracción de sustancias húmicas, además del uso de distintas técnicas espectroscópicas como Absorción Atómica (EAA) y Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS).

El presente trabajo pretende estudiar la materia orgánica y su efecto sobre la biodisponibilidad de los metales usando un modelo de equilibrio químico (Windermere Humic Aqueous Model, Versión 7), cabe señalar que el programa no se ha probado en sistemas acuáticos con altos niveles de materia orgánica y es una oportunidad para evaluar los alcances y límites del programa. Se realizaron los análisis los siguientes sitios: Canal de Ampampilco, Canal de la Apatlaco, Canal de la Asunción y el Canal de la Draga.

Los contaminantes determinados en esta Tesis se encuentran en el agua y en las partículas suspendidas que se encuentra flotando en la misma. Los metales pesados resultan especialmente preocupantes, por su carácter acumulativo en el medio ambiente y en los organismos de la zona de Xochimilco que a su vez puedan afectar al ser humano y/o a otros organismos a través de la cadena trófica.

En relación a las concentraciones de metales totales en el agua, el hierro se encuentra por encima de los demás metales analizados y solo el níquel presente en la Canal de Ampampilco se encuentra por encima de los límites máximos permisibles según la NOM-001-SEMARNAT-1996 lo que puede ser una consecuencia de la actividad agrícola en el sitio.

El cadmio se encontró como el metal que se encontraba en menor concentración en el agua de los canales y se encontró en mayor concentraciones tanto en el Canal de Ampampilco como en el de la Draga, siendo éste último el canal donde se encuentra la tubería de descarga de la planta de tratamiento de agua del Cerro de la Estrella.

Capítulo 1. Marco Teórico.

1.1. Características de la Zona de Estudio.

La cuenca de Xochimilco, es el último relicto de chinampería en la zona metropolitana de la Ciudad de México debido al avance de la mancha urbana. Antiguamente formó parte de un sistema lacustre formado por varios lagos que cubrían una extensión aproximada de 1 500 Km² y que en la época de lluvias se extendía como un enorme vaso por prácticamente toda la cuenca México.

La creciente demanda de agua potable en la cuenca ha reducido significativamente el aporte de aguas superficiales de buena calidad hacia el sistema de canales de Xochimilco (Vidrio y Ávila, 2000). Paralelamente los procesos de erosión aumentan el aporte de sedimentos. Lo anterior ha repercutido en una creciente salinización del sistema lacustre y de un azolvamiento de las partes más bajas. Adicionalmente el aporte de residuos urbanos, el uso intensivo de fertilizantes y el vertimiento de aguas residuales ha fomentado la entrada de nutrientes y materia orgánica al sistema.

Por su parte, Xochimilco fue nombrado por la UNESCO patrimonio de la humanidad y México se comprometió a resguardarlo. Sin embargo la urbanización, el vertimiento de aguas residuales, el uso indiscriminado de fertilizantes y plaguicidas, la sobreexplotación del acuífero y la introducción de especies comerciales están deteriorando este ambiente. Actualmente está en riesgo la supervivencia de especies endémicas, la producción de las chinampas ha bajado por salinización (Bojorquez y Villa 1995) y los canales están contaminados con microorganismos (Rosas, Baez *et al.* 1984), lo que representa un riesgo para la salud.

Xochimilco es un ecosistema muy particular: es considerado como un humedal cuya dinámica de sedimentos ha sido modificada por el hombre para aumentar la productividad agrícola (Bojorquez y Villa, 1995). Actualmente, la creciente urbanización lo ha convertido en un lago urbano que debe mantener la productividad agrícola pero también cumplir con funciones recreativas, además de resguardar el patrimonio cultural y natural que representa.

Un gran problema para la zona es el enorme desbalance hídrico, en el que el restablecimiento del equilibrio hídrico de la Cuenca no ha sido posible ya que año con año la pérdida de agua es muy grande debido a que la recarga natural de los manantiales subterráneos ha disminuido y la extracción de agua de pozos ha aumentado. El problema se agudiza aunado a la contaminación que sufre el sistema de canales y chinampas a través de la descarga de más de 3500 drenajes domésticos más los tóxicos disueltos en las aguas parcialmente tratadas en las plantas de tratamiento del Cerro de la Estrella en Iztapalapa y San Luis Tlaxialtemalco, que gran parte han aportado hacia el agua de los canales.

Ambas fuentes aumentan el grado de contaminación por material fecal (bacterias entre otros microorganismos) y tóxicos (metales pesados, plaguicidas, etc.) industriales en las aguas que llegan al lago. El suelo salino y la poca o nula circulación del agua de los canales, ahora que sus manantiales no existen, junto con la contaminación agravan el efecto del estancamiento y ensalitramiento de las aguas con problema de asfixia e intoxicación para los organismos acuáticos, fomentando la vida acuática superficial que a la larga disminuye la concentración de oxígeno disuelto.

Cuando las aguas de desecho muestran contenidos altos de metales pesados y microelementos, resultan por demás peligrosos ya que generan desequilibrios en relación con los nutrientes esenciales, originando problemas de toxicidad y deficiencia, que en las condiciones críticas pueden alterar las cadenas tróficas y afectar gravemente la condición de los organismos presentes en el agua y consecuentemente al ser humano.

Anteriormente el uso de aguas negras en esta zona le aportaban a los suelos de las chinampas elementos esenciales para las plantas y las cosechas se incrementaban, sin embargo, en los últimos años la productividad ha disminuido y se atribuye esto a que las aguas residuales contienen cada vez mayor cantidad de desechos industriales (Faud, 1991). Entre los que se encuentran metales pesados y micronutrientes en concentraciones elevadas, así como gran cantidad de bacterias, virus y sales.

1.2. Zona lacustre del lago de Xochimilco.

1.2.1. Hidrografía.

A la llegada de los españoles a la Cuenca del Valle de México, *Figura 1.0*, existía un extenso cuerpo de agua conformado por los siguientes lagos: en el norte Zumpango, Xaltocan y San Cristobal; en el centro México-Texcoco y en el sur Chalco-Xochimilco. La mayor parte de los ríos de la cuenca son de carácter torrencial con avenidas de corta duración a veces peligrosas. (Jáuregui, 1987), (Balanzario, 1976). Al sur de Xochimilco había importantes infiltraciones que aún afloran al pie de la Sierra.

Otro aspecto importante que ha influido en las condiciones ecológicas de los canales del Lago de Xochimilco fue la decisión del Gobierno Federal de mandar las aguas a un tratamiento incompleto que no remueve sales, contaminantes pesados ni todos los microorganismos patógenos que llegan a los canales causando malos olores y matando vegetación y animales (Ballinas, 1990; Chanlett, 1976).

El agua usada para la agricultura proviene de tres fuentes principales: de la precipitación pluvial directa, de los escurrimientos torrenciales y finalmente de las aguas tratadas. Desafortunadamente el agua de los torrentes y las aguas negras constituyen serios problemas para la chinampería, provocando el paulatino ensalitramiento de los suelos debido a la falta de drenaje de esas aguas y la imposibilidad de lavado del suelo y por otro lado el incremento de la población que llegan a los canales acarreando basura (Canabal *et al.* 1989).

En 1959, se construyó la primera etapa de la planta tratadora, con capacidad de 400 L s^{-1} . En 1967 el Departamento del Distrito Federal consideró conveniente ampliar a 1200 L s^{-1} considerando que de esa forma se podría mantener el nivel de las aguas del Lago de Xochimilco.

El origen del agua en el lago de Xochimilco puede interpretarse como resultado de la llegada de filtraciones de lluvia que produjeron flujos locales e intermedios. Se presentan como pequeñas corrientes los ríos Parres y Santiago que bajan desde las estribaciones de la sierra del Ajusco, el Río San Lucas que desagua en el lago y el Río San Buenaventura, que baja por el este del Ajusco y desemboca en el Canal Nacional.

Las corrientes que configuran la cuenca de Xochimilco son: los Ríos San Buenaventura, Santiago, San Lucas y San Gregorio, así como numerosas y pequeñas corrientes que bajan a Nativitas, San Luis Tlaxialtemalco, Tulyehualco, Iztapalapa y Tláhuac, proviniendo, en los dos últimos casos del cerro de la Estrella y de la sierra de Santa Catarina.



Figura 1.0. Imagen de la Antigua Cuenca del Valle de México (Gamma E., 2014).

Dentro de los humedales en la zona lacustre, sobresalen por sus dimensiones, las Chinampas y su red de canales, que a pesar de la gran importancia productiva y su fragilidad ecológica, es en años recientes que se ha tomado en cuenta la relevancia que representan como unidades de producción agrícola.

1.2.2. Orografía.

Las sierras de que está rodeada la cuenca son: al Este la Sierra Nevada; al Oeste la Sierra de las Cruces; al Sur la Sierra de Chichinautzin y al Norte de las Sierras de Pachuca y Tezontlalpan. (Mooser, F. 1987). La demarcación se ubica dentro de la Cuenca de México, *Figura 1.1, 1.2*, forma parte de la provincia fisiográfica denominada Eje Volcánico Transversal, sistema montañoso que rodea amplios valles a los que llegaban las aguas de numerosos arroyos que descendían de los cerros durante la época de lluvias formando una gran laguna, a su vez Xochimilco forma parte de la subprovincia llamada Lagos y Volcanes de Anáhuac.

La parte sur de la delegación Xochimilco es la más abrupta, está cruzada por la Sierra del Ajusco donde sobresale como elevación principal el cerro Teuhtli, ubicado en el límite con la delegación de Milpa Alta. De este a Oeste se localizan los cerros de Tlamaxcalco, Teoca, Tochuca, Zompole y Tlamapa. Hacia el noroeste, en el límite con Tlalpan, se encuentran los cerros Tehuanpaltepetl, La Cantera, Texomulco y Xochitepec.



Figura 1.1. Mapa de la antigua Cuenca de México. (Arqueología Mexicana, Foto de Archivo, Vela E.)

1.3. Características de los Humedales.

La palabra humedal se asocia generalmente a lugares con humedad; y precisamente se trata de sitios cuyo suelo se encuentra saturado de agua. Es decir, que existe una columna de agua sobre la superficie del suelo o ésta se encuentra a pocos centímetros debajo de la superficie del mismo. En los humedales, aparte del suelo y el agua, otro de los componentes característicos de dichos sitios es la vegetación. Existen diferentes tipos de humedales y también una gran variedad de definiciones (Martínez, M., INECOL).

Una de las definiciones más conocidas y utilizadas es la del convenio de RAMSAR cuya prioridad es la de proteger los humedales y fue iniciado en Ramsar Irán en 1971. Dicho convenio define a los humedales como todas aquellas extensiones de superficies cubiertas de agua, ya sean éstas de régimen natural o artificial, de forma temporal o permanente, de forma estancada o corriente, dulce, salobre o salada, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de 6 metros.

Los tipos de humedales existentes varían con respecto de su localización, régimen de inundación o tipo de vegetación. En México, han sido clasificados principalmente en tres ámbitos.

- **Marinos y estuarinos:** los ubicados sobre la zona costera cuya entrada de agua es principalmente salada o salobre (mezcla de agua dulce y salada), debido a entradas ocasionales de agua dulce.
- **Lacustres:** los situados en zonas represadas como los lagos, y a aquellos humedales que se originan a orillas de éstos.
- **Palustres:** dentro de esta clasificación se incluyen los humedales cuya entrada de agua es únicamente dulce, es decir, aquellos que se ubican en las zonas de borde de ríos, lagunas de agua dulce o planicies inundables.

Los humedales son reconocidos por las múltiples funciones que desempeñan:

- Sirven de hábitat, ya que brindan refugio para una gran variedad de fauna acuática, terrestre y de aves.
- Transformador y amortiguador.
- Se producen productos que sirven como materia prima para construcción, recursos alimenticios, medicinales y ornamentales, todos éstos, resultado de los procesos químicos y biológicos de los humedales.
- La belleza escénica y el aporte recreativo y educacional son funciones culturales que presentan.
- Regulan procesos ecológicos esenciales para la vida, ejemplo de ello son los ciclos hidrológicos y de carbono, por lo que son importantes ambientes sedimentarios (Marín, J. y Hernández, M., INECOL).

El CO₂ atmosférico es absorbido por las plantas y convertido en carbohidratos y tejidos a través del proceso de fotosíntesis, como parte del ciclo del carbono. En estos sitios, el almacenamiento de carbono no sólo se da en la parte aérea y radicular de las plantas, si no también, en el suelo. Cuando los residuos de la vegetación del humedal caen al suelo, el material vegetal se acumula y se forma una capa de suelo muy rica en materia orgánica (sedimentos). Parte de los residuos orgánicos de las plantas se degrada, aunque otra porción permanece sin descomponerse debido a las condiciones de inundación del suelo por lo que el material vegetal se incorpora al suelo como material orgánico no descompuesto, conocido como sustancias húmicas (Marín, J. y Hernández, M., INECOL).

El almacenamiento de carbono de los suelos de humedales es uno de los principales servicios ambientales que dichos ecosistemas proveen.

1.4. Efecto de las aguas de las plantas de tratamiento.

En sistemas acuáticos con una entrada importante de materia orgánica como son las aguas de las Plantas de Tratamiento se producen gradientes de potencial Redox en los sedimentos, dando como resultado un cambio vertical gradual tanto en las fases sólidas como en las comunidades de microorganismos asociados. Los ambientes se transforman de aerobios a anaerobios, lo que repercute en la solubilidad de los metales, fomenta la producción de metano y óxidos nitrosos y modifica los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y azufre.

Por su parte, las sustancias húmicas SH como parte de la materia orgánica constituyente de los sedimentos, son una importante fuente de carbono orgánico en todos los ambientes terrestres y acuáticos y participan en una variedad de procesos bioquímicos y geoquímicos, además de ser un reservorio muy importante en el ciclo del carbono.

Conjuntamente, las SH tienen la increíble habilidad de interactuar con iones metálicos y compuestos orgánicos, tales como son los contaminantes comunes, para formar complejos solubles o insolubles en agua con estabilidades químicas y biológicas muy variadas. Tales propiedades afectan el comportamiento de los contaminantes, incluyendo la velocidad y grado de descomposición, fotólisis, volatilización, migración y absorción biológica. Es por ello que la elucidación de las sustancias húmicas en los sedimentos, es una fuente de información para el diagnóstico temprano de los impactos ambientales y el monitoreo de los procesos de degradación de contaminantes.

1.4.1. *Ventajas y desventajas del uso de aguas residuales.*

❖ *Ventajas del Uso de Aguas Residuales.*

- Se fomenta el desarrollo agropecuario y floricultura.
- Son una fuente de abastecimiento de agua para riego con bajo costo y seguro durante todo el año.
- Es una forma económica de disponer las aguas residuales, para evitar problemas de contaminación en cuerpos de agua como son: ríos, lagos, presas y otros.
- Aumenta el valor de los terrenos haciéndolos pasar de cultivos de temporal a de riego.
- Se aprovechan efectivamente los nutrimentos contenidos en las aguas residuales, como N-P-K, al igual que otros micronutrientes, lo que disminuye la demanda de fertilizantes para la obtención de altos rendimientos en la producción.
- Se incorporarán cantidades significativas de materia orgánica que modificarán la estructura del suelo.
- Esta práctica de aprovechamiento de agua residual proporciona un tratamiento adicional, comparable a un nivel secundario, para el agua de infiltración que en muchos casos ayuda a la recarga de mantos subterráneos.
- Mejora el medio ambiente circundante de los núcleos urbanos por permitir la creación de zonas verdes y agrícolas permanentes.
- En suelos alcalinos, como los que se encuentran en las regiones áridas y semiáridas se presenta una capacidad de amortiguamiento de ellos hacia sustancias tóxicas. (Manual of Instruction for sewage treatment plant operators, 2008)

❖ Desventajas del Uso de Aguas Residuales.

- Los compuestos tóxicos y organismos patógenos, contenidos en las aguas residuales, pueden ocasionar contaminación de suelos y cultivos afectando la cadena trófica de incluye al hombre.
- Algunos compuestos solubles como son los metales pesados, pueden estar presentes en las aguas residuales en concentraciones tóxicas para las plantas.
- Cuando las aguas residuales no se tratan convenientemente, pueden causar problemas a la Salud Pública.
- Puede existir el peligro de contaminación de acuíferos por inyección y/o infiltración de las aguas residuales.
- El contenido de sales de las aguas residuales, ocasiona problemas en terrenos como mal drenaje, disminuyendo la calidad en los suelos y en consecuencia la productividad.
- Se incrementa la incidencia de plagas y enfermedades lo que aumenta el consumo de plaguicidas. (Torres, 1992)

1.5. Sustancias Contaminantes.

La contaminación se caracteriza por la presencia de sustancias en el medio ambiente que causan un daño a la salud y al bienestar del hombre o que ocasiona desequilibrio ecológico. Esto sucede cuando los contaminantes exceden ciertos límites considerados tolerables; se trata en general de fenómenos que evolucionan lentamente en el tiempo y su efecto nocivo se manifiesta por un deterioro progresivo de las condiciones ambientales. La contaminación puede darse en aire, agua y suelo, y en cada caso presenta características propias que requieren medidas de prevención y remediación peculiares, que son prerrogativa del sector de protección al ambiente, y normalmente quedan fuera del ámbito de la protección civil (Izcapa, T. C. et al, 2006). Las sustancias contaminantes pueden agruparse en distintas categorías según sus afecciones tanto al medio ambiente como a la salud.

En México no se cuenta con suficientes volúmenes de agua para satisfacer las demandas de abastecimiento de todos los sectores, pero el creciente deterioro en la calidad del recurso hidráulico debido a la contaminación por descargas de aguas residuales sin tratar, limita sus posibilidades de uso e incrementa sustancialmente el riesgo de afectar la salud de la población aledaña y el ambiente, por otra parte también se encuentran sustancias tóxicas procedentes de los efluentes industriales y plaguicidas provenientes de las aguas de retorno agrícola, esto puede representar un riesgo a la población por intoxicación por beber agua contaminada o por comer peces contaminados con dichas sustancias.

1.5.1. Origen de las sustancias contaminantes.

Las sustancias consideradas como contaminantes casi siempre se originan en la *antropósfera*. El destino final de estas sustancias es el aire, el suelo, el agua (superficial y subterránea), los sedimentos y la biota (las plantas y los animales); todas las esferas ambientales están incluidas en la generación y transporte de residuos, en este caso particular los metales (Figura 1.3).

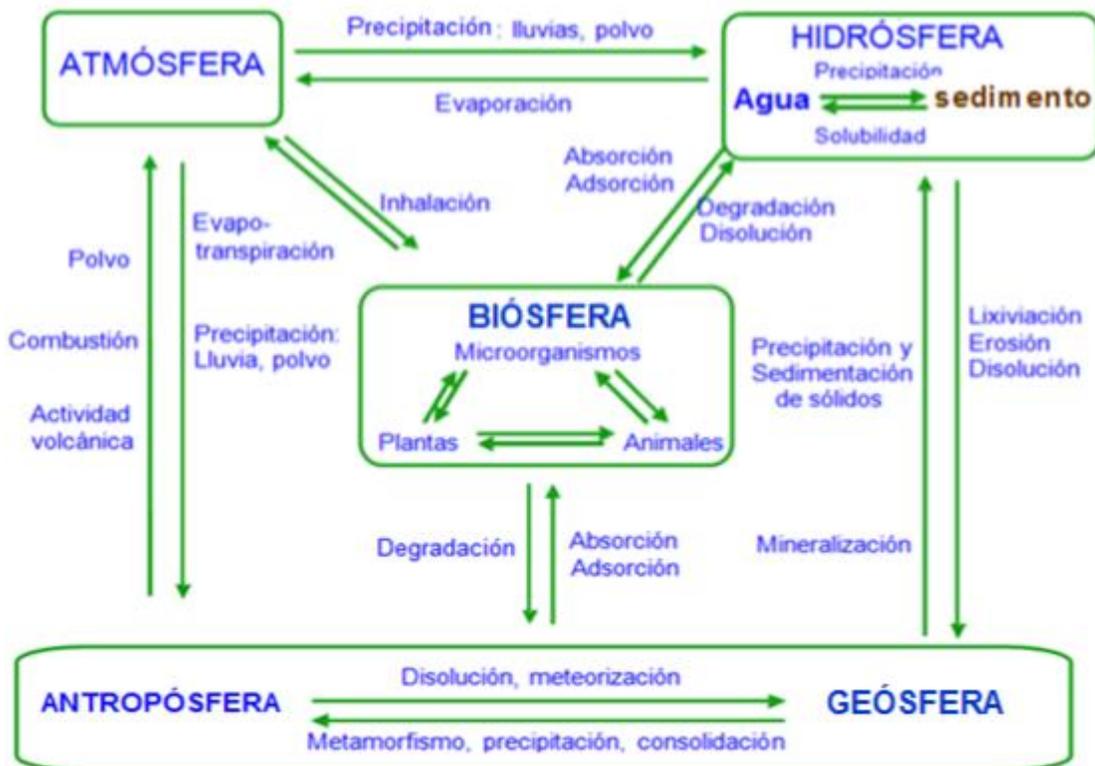


Figura 1.3. Ciclo biogeoquímico de los metales en las esferas ambientales (Fergusson, J. E., 1990).

El lugar donde son retenidos, depende de sus propiedades y de las condiciones del medio en que son introducidas. El transporte y destino de metales, está controlado por sus interacciones físicas (movimiento sin reaccionar o interactuar con otras fases) y su reactividad, que incluye reacciones químicas y bioquímicas con otras fases (Manahan, S., 2007).

1.5.2. Tipo de Contaminantes.

Los contaminantes pueden dividirse en dos grupos, los principales constituyen propiamente la contaminación y los menores son producto de determinados procesos:

- a) Partículas sólidas
- b) Compuestos de azufre
- c) Compuestos de carbono (principales contaminantes)
 - Hidrocarburos
- d) Compuestos de Nitrógeno
 - Oxidantes fotoquímicos
- e) Poluciones fotoquímicas:
 - Derivados de Plomo
 - Derivados de Mercurio
- f) Contaminantes menores:
 - Derivados de ácido fluorhídrico
 - Asbestos

Cuando las aguas residuales se incorporan al suelo, los metales pesados pueden ser removidos por los vegetales, lixiviados por las aguas que llegan a los acuíferos o a las aguas superficiales, o pueden quedar fuertemente retenidos por las partículas finas del suelo. Dependiendo del medio en que se encuentren, las interacciones físicas pueden dividirse en dos categorías. La primera de éstas es la convección, que se debe al movimiento de masas de fluidos (aire, agua) que simplemente los llevan con ellos. La segunda forma de movimiento de las especies químicas es el transporte por difusión, que consiste en la tendencia natural de las moléculas a moverse desde las regiones de alta concentración a las regiones de más baja concentración por el movimiento aleatorio de las moléculas (Manahan, S., 2007).

1.5.3. *Propiedades de los contaminantes.*

1.5.3.1. *Metales pesados.*

Se denomina metales pesados a aquellos elementos químicos que tienen un número atómico por arriba de 20, excluyendo generalmente a los metales alcalinos y elementos alcalinotérreos; y que presentan una gravedad específica superior a 4.5 y hasta 7 (Bradl, H.B., 2005). Estos metales se introducen en los ciclos biogeoquímicos por procesos naturales como erupciones volcánicas, degradación de rocas y minerales, pero su omnipresencia y el aumento de sus concentraciones en tiempos recientes es consecuencia de las muy diversas actividades antropogénicas. Los metales de origen antrópico llegan a los sistemas acuáticos a través de aguas residuales industriales, agrícolas y domésticas o por deposición desde la atmósfera (Figaruelo, J., 2001).

La toxicidad de los metales en el medio acuático, depende de la forma química en que se encuentren: iones simples o complejos, óxidos o hidróxidos, etc., dependen de la especiación del elemento, ya que las interacciones de los componentes celulares se establecen con una especie química particular de cada elemento.

La determinación de la cantidad total de metal en un medio acuático es inadecuada desde el punto de vista ambiental, en el que lo importante es evaluar la cantidad de especies metálicas tóxicas. La solubilidad, y generalmente la biodisponibilidad de las especies metálicas varía con la temperatura, pH, tamaño y la naturaleza de las partículas adsorbentes del sistema acuático que agrupa las fases y las especies químicas en las que se presenta el metal dentro de la columna de agua, *Figura 3.20*.

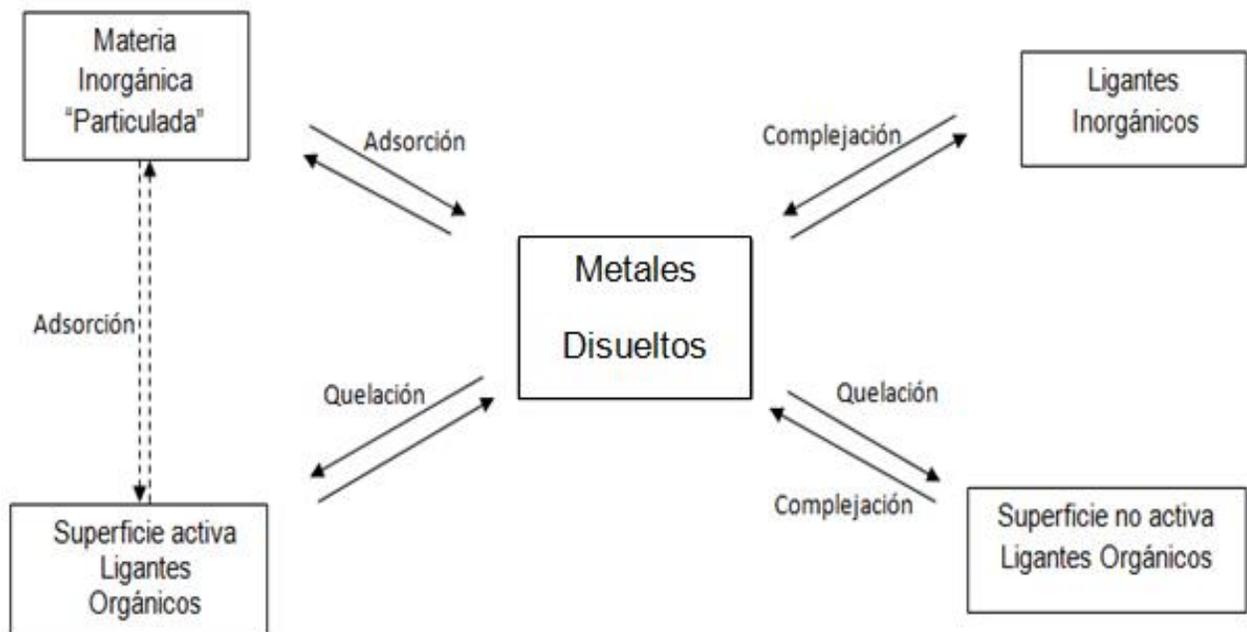


Figura 1.4. Matrices en las que el metal se encuentra en el agua.

De esta manera, en la columna de agua los iones metálicos se encuentran presentes en el agua asociados a diferentes ligandos o contraiones, por ejemplo: materia orgánica, óxidos de Fe, Mn y Al, carbonatos, sulfuros y sulfatos entre otros aniones. Además se pueden encontrar retenidos en otras fases como partículas suspendidas por diferentes mecanismos como el intercambio iónico, la formación de complejos, precipitación y adsorción (Alleyne, S. 2004).

1.5.3.2. *Compuestos Orgánicos Persistentes (COP).*

Los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), conocidos también por su acrónimo inglés POPs (Persistent Organic Pollutants), son sustancias químicas:

- *Persistentes*, ya que tienen una elevada permanencia en el medio ambiente, al ser resistentes a la degradación.
- *Bioacumulables*, incorporándose en los tejidos de los seres vivos y pudiendo aumentar su concentración a través de la cadena trófica.
- *Altamente tóxicos*, y que provocan graves efectos sobre la salud humana y el medio ambiente.
- Que tienen potencial para *transportarse a larga distancia*, pudiendo llegar a regiones en las que nunca se han producido o utilizado. Los COP son volátiles en el rango de temperaturas de las latitudes medias. Transportados por la atmósfera, se condensan y depositan en las zonas frías a gran altura o en las latitudes altas. Por su persistencia, pueden ser depositados y volver a volatilizarse en ciclos sucesivos en función de las temperaturas ambientales, produciéndose el efecto conocido como "saltamontes".

En consecuencia, suponen una amenaza para la salud humana y el medio ambiente de todo el planeta.

La Comunidad Internacional y más concretamente las Naciones Unidas, ha generado instrumentos importantes para regular y controlar los COP. El más ambicioso es el Convenio de Estocolmo, cuyo objetivo es proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los COP, eliminando, y cuando esto no sea posible, reduciendo, las emisiones y las descargas de estos contaminantes (CNR COP, España).

1.5.3.3. Sustancias Eutrofizantes (NO_x).

Los gases eutrofizantes (NO_x y NH₃) son aquellos que favorecen la eutrofización en las masas de agua superficiales, proceso por el que el agua sufre un enriquecimiento anormal de nutrientes dando lugar a efectos adversos como la pérdida de calidad, descenso de oxígeno, aparición de toxinas, etc. Los óxidos de nitrógeno son un grupo de estos gases compuestos por óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). El término NO_x se refiere a la combinación de ambas sustancias.

Se ha hecho referencia a las propiedades, efectos sobre la salud y el medio ambiente del dióxido de nitrógeno, ya que es el contaminante principal de los NO_x, se forma como subproducto en todas las combustiones a altas temperaturas. Se trata de una sustancia de color amarillento, que se forma en los procesos de combustión en los vehículos motorizados y las plantas eléctricas. Es un gas tóxico, irritante y precursor de la formación de partículas de nitrato, que conllevan la producción de ácidos y elevados niveles de PM_{2.5} en el ambiente. Presenta buena solubilidad en agua, reaccionando y formando ácido nítrico (HNO₃) según la siguiente reacción:



Por otra parte el NO₂ se forma a partir de la oxidación del óxido nítrico (NO), y tiene una vida corta en la atmósfera ya que se oxida rápidamente a nitratos (NO₃⁻) o a HNO₃ (ácido nítrico). En este último caso, se produce el fenómeno de la lluvia ácida que consiste en la reacción de los nitratos (NO₃⁻) con la humedad existente en el ambiente, dando lugar a ácido nítrico (HNO₃), que precipita la acidificación de los suelos por el lixiviado de bases. Sin embargo, la cantidad de acidez que se deposita en el agua de lluvia es menor, en promedio, que la creada a través de las actividades antropogénicas (EINECS, PRTR España, 2007).

1.5.3.4. Plaguicidas.

Se denomina plaguicida a cualquier sustancia o mezcla de sustancias que se destine a controlar una plaga, incluyendo los vectores de enfermedades humanas y de animales, así como las especies no deseadas que causen perjuicio o que interfieran con la producción agropecuaria y forestal. Otros ejemplos, son las plagas que causan daño durante el almacenamiento o transporte de los alimentos u otros bienes materiales, así como las que interfieran con el bienestar del hombre y de los animales. Se incluyen en esta definición las sustancias defoliantes y las desecantes (INECC, 2013).

En México la autoridad que regula a los plaguicidas es la Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas (CICOPLAFEST) que fue creada a través del decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el día 15 de octubre de 1987 (INECC, 2013). Los plaguicidas pueden clasificarse de acuerdo con la CICOPLAFEST de la siguiente manera:

1) Concentración.

- I. Ingrediente activo. Compuesto químico que ejerce la acción plaguicida.
- II. Plaguicida técnico. La máxima concentración del ingrediente activo obtenida como resultado final de su fabricación, de la que se parte para preparar un plaguicida formulado.
- III. Plaguicida formulado. Mezcla de uno o más plaguicidas técnicos, con uno o más ingredientes conocidos como “inertes”, cuyo objeto es dar estabilidad al ingrediente activo o hacerlo útil y eficaz; constituye la forma usual de aplicación de los plaguicidas.

2) Organismos que controlan.

- | | |
|-----------------|------------------|
| I. Insecticidas | IV. Rodenticidas |
| II. Fungicidas | V. Bactericidas |
| III. Acaricidas | VI. Herbicidas |

3) *Modo de acción.*

- | | |
|-----------------|------------------|
| I. De contacto | IV. Defoliantes |
| II. Repelentes | V. Sistémicos |
| III. Fumigantes | VI. De ingestión |

4) *Composición Química.*

- | | |
|----------------------|----------------------------------|
| I. Organoclorados | VIII. Carboxamidas |
| II. Piretroides | IX. Tiocarbamatos |
| III. Organoazufrados | X. Ftalimidas |
| IV. Organofosforados | XI. Dinitrofenoles |
| V. Aceites minerales | XII. Trazinas |
| VI. Clorofenoxi | XIII. Guanidinas y naftoquinonas |
| VII. Carbamatos | XIV. Compuestos de cobre. |

Los plaguicidas están diseñados en la mayoría de los casos para eliminar plagas. Sin embargo, muchos de ellos pueden representar un riesgo a los seres humanos. Por otro lado, en la mayoría de los casos la cantidad de estas sustancias a las que se encuentra expuesta la gente es muy pequeña como para representar un riesgo. Para determinar su riesgo, se deben considerar tanto la toxicidad como la probabilidad de exposición. Esto es: un bajo nivel de exposición a un plaguicida extremadamente tóxico puede no ser más peligroso que un alto nivel de exposición a uno de baja toxicidad.

Los seres humanos están expuestos diariamente a miles de ellos en forma individual o combinados a través del aire, agua, alimentos y polvo. Esto es, los efectos a la salud que provocan dependen del tipo, por ejemplo: los organofosforados y los carbamatos afectan al sistema nervioso, mientras que otros irritan la piel o los ojos, y algunos pueden ser cancerígenos, y otros pueden afectar el sistema hormonal y endocrino del cuerpo (INECC, 2013).

1.6. Metales pesados en aguas residuales.

1.6.1. Efecto de los metales pesados contenidos en aguas residuales.

Se consideran dentro de este grupo al cobre, zinc, cadmio, plomo, níquel, cobalto, cromo y mercurio. La cantidad presente en las aguas residuales dependerá de si el residuo es doméstico o industrial, los domésticos llevan una concentración muy baja, si es que los contienen, y las aguas de desecho industrial suelen contener elevadas concentraciones de uno o varios de ellos.

Cuando las aguas residuales se incorporan al suelo, los metales pesados pueden ser absorbidos por los vegetales, lixiviados por las aguas que llegan a los acuíferos o a las aguas superficiales, o pueden quedar fuertemente retenidos en la matriz del suelo. Hay que señalar también que en algunos casos existen aguas que sufren un proceso de enriquecimiento natural en metales al atravesar acuíferos formados por rocas que los contienen en su composición.

Al aplicar aguas residuales con altos contenidos de metales pesados su concentración se incrementará tanto que, de acuerdo con los principios generales del comportamiento biológico, pueden resultar tóxicos, tanto a los microorganismos del suelo, como a los cultivos (Charles, W. 1993). Sin embargo en la mayoría de los casos esto no puede ser, sobre todo cuando se aplican aguas residuales domésticas, debido a que los metales quedan retenidos en la materia orgánica o arcilla que contienen los suelos o simplemente se transportan a regiones más profundas, inclusive hasta llegar a las aguas subterráneas.

En realidad, el mayor peligro que presentan los metales pesados contenidos en las aguas residuales usadas para riego, es que pueden acumularse en los cultivos y entrar a la cadena de alimentación de tal forma que rebasen los límites máximos tolerables estipulados para preservar la salud de los consumidores.

1.6.2. Contaminación del Suelo.

Esta contaminación es ocasionada principalmente por depósitos de residuos sólidos o líquidos sobre la superficie del suelo o el subsuelo. La inadecuada disposición de los desechos orgánicos del hombre, también favorece la propagación de ciertas enfermedades parasitológicas y bacteriológicas.

Sin embargo, los límites de asimilación o degradación de las sustancias, elementos y patógenos llevados por las aguas residuales a los suelos, pueden ser rebasados o bien existir acumulación a través de la cadena trófica (cultivo-hombre o cultivo ganado-hombre) (CONAGUA, 2010).

La capacidad del suelo en la retención de los elementos necesarios para mantener el crecimiento de las plantas, es debida en parte a su carácter negativo que atrae a los elementos positivos (Ca^{++} , Mg^+ , K^+ , Na^+ , Fe^{++} , Zn^{++} , Mn^{++} , Ni^{++} , Cd^{++} , Cu^{++} , Pb^{++} , etc.). En general, los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir diferentes vías de movilización como las que se señalan en la *Figura 1.5*. Éstos pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la fase acuosa, ocupando sitios de intercambio, o específicamente adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos, asociados con la materia orgánica y/o precipitados como sólidos puros o mixtos.

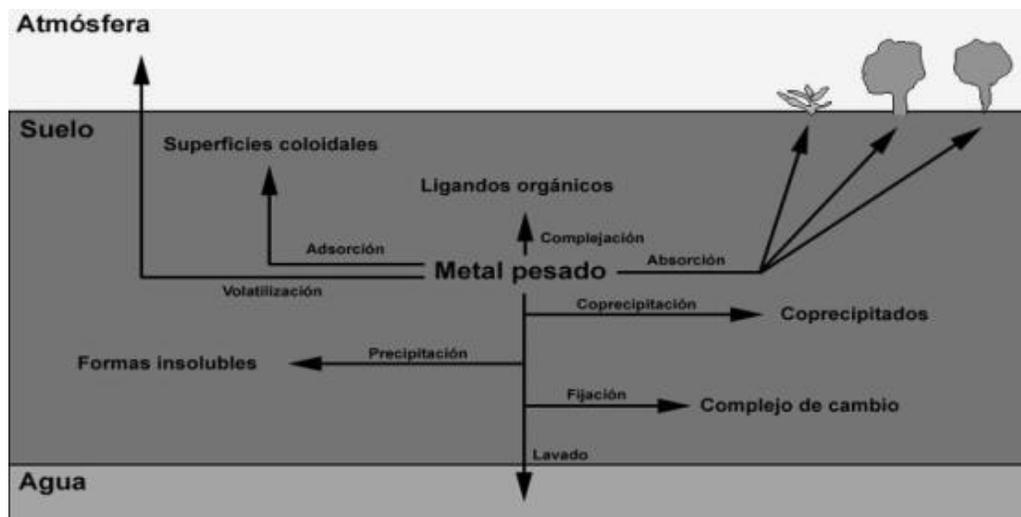


Figura 1.5. Movilización de metales pesados en el suelo (Hernández, M., 2009).

1.6.3. Contaminación por actividad agrícola.

El resultado de la agricultura moderna, ha permitido obtener un notable incremento en la productividad, pero también ha sido la causa de la difusión de productos químicos en la naturaleza, diseminados por doquier a través del ciclo hidrológico. Por lo que se refiere a fertilizantes modernos el agricultor actual acostumbra fertilizar en exceso sus suelos, de manera que el sobrante es arrastrado por el agua que resulta así sobrecargada de nutrimentos, provocando un exceso de materia orgánica en los lagos y ríos trayendo como consecuencia el proceso de eutroficación.

El uso de semillas mejoradas que se vuelven más resistentes a factores ambientales y bióticos evita incrementar el uso de fertilizantes, usar agroquímicos en mayor cantidad, así como el uso indiscriminado de maquinaria. Así también el uso de los riegos intensivos (agua de mala calidad generalmente) que es considerada otra práctica agrícola que ocasiona contaminación de suelos por un exceso de sales. El efecto de la sal consiste principalmente en reducir la habilidad de las plantas para absorber agua y los elementos disueltos en ella (Tejeda, G. C. 2001).

Con el creciente aumento de la contaminación ambiental de la población mundial se hace necesario estudiar a niveles enzimáticos y moleculares que ocurre en los cultivos cuando se encuentran en situaciones de estrés ya sea por salinidad, sequía o por metales pesados con el objetivo de determinar donde se pueden o no sembrar.

1.6.4. Comportamiento de los metales pesados en el ambiente.

Las propiedades químicas de los metales pesados nos indican que su movilidad en los suelos es regida por el equilibrio entre el agua, los carbonatos, los silicatos y los óxidos. Estos factores han controlado la deposición y disolución de los yacimientos naturales de los metales pesados. Otro proceso de importancia es la interacción de los cationes metálicos con los aniones de la solución del suelo para formar complejos con aniones orgánicos.

Cuando los metales pesados son incorporados al suelo, pueden ser tomados por los cultivos, lixiviados hasta llegar a los mantos acuíferos, o bien pueden quedar fijados fuertemente a la matriz del suelo. El camino que sigan dependerá del tipo de metal y de su estado químico, del pH, contenido de materia orgánica del suelo, capacidad de intercambio catiónico, entre otros factores para así entrar en los ciclos biológicos como se observa en la *Figura 1.6*.

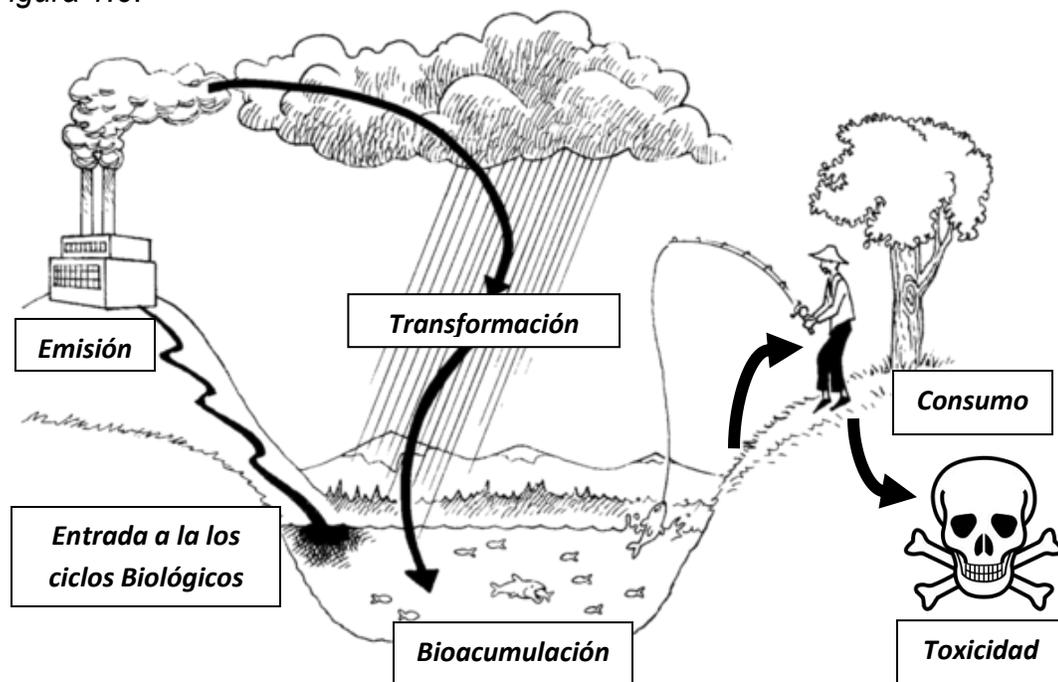


Figura 1.6. Camino de los metales pesados a través de los ciclos biológicos.

1.7. Origen y propiedades fisicoquímicas de los metales geogénicos, antropogénicos y macronutrientes.

1.7.1. Metales Geogénicos.

1.7.1.1. Vanadio ($_{23}\text{V}$).

El vanadio es un elemento químico de aspecto metálico gris plateado y pertenece al grupo de los metales de transición, la formación de una capa de óxido del metal estabiliza al elemento contra la oxidación. El número atómico del vanadio es 23. El símbolo químico del vanadio es V y su peso atómico es de 50.942 gmol^{-1} . El punto de fusión del vanadio es de $1902,85 \text{ }^\circ\text{C}$ (2175K) y el punto de ebullición es de $3409,85 \text{ }^\circ\text{C}$ (3682K), presenta una densidad de 4.5 gmL^{-1} .

El Vanadio puede ser encontrado en el ambiente, en algas, plantas, invertebrados, peces y muchas otras especies. En mejillones y cangrejos se acumula fuertemente en concentraciones de 10^5 a 10^6 veces mayores que las concentraciones que son encontradas en el agua salada.

1.7.1.2. Cobalto ($_{27}\text{Co}$).

Elemento químico metálico, Co, con número atómico de 27 y un peso atómico de 58.93 gmol^{-1} . El cobalto se parece al hierro y al níquel, tanto en estado libre como combinado. Se encuentra distribuido con amplitud en la naturaleza y forma, aproximadamente, el 0.001% del total de las rocas ígneas de la corteza terrestre, en comparación con el 0.02% del níquel. Presenta una densidad relativa de 8.9 gmL^{-1} a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Su punto de fusión de $1495 \text{ }^\circ\text{C}$ (1768K) y de ebullición de $2927 \text{ }^\circ\text{C}$ (3200K). Normalmente se encuentra junto con níquel, y ambos suelen formar parte de los meteoritos de hierro. Es un elemento químico esencial para los mamíferos en pequeñas cantidades.

Presenta estados de oxidación bajos. Los compuestos en los que el cobalto tiene un estado de oxidación de 4^+ son poco comunes. El estado de oxidación 2^+ es muy frecuente, así como el 3^+ . También existen complejos importantes con el estado de oxidación 1^+ .

El Cobalto no puede ser destruido una vez que este ha entrado en el medioambiente. Puede reaccionar con otras partículas o ser absorbido por las partículas del suelo o el agua. El Cobalto se mueve sólo bajo condiciones ácidas, pero al final la mayoría del Cobalto terminará en el suelo y sedimentos.

1.7.1.3. Cobre ($_{29}\text{Cu}$).

Elemento químico de símbolo Cu, con número atómico 29 y peso molecular de $63,54 \text{ gmol}^{-1}$; uno de los metales de transición esenciales. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia. Un metal comparativamente pesado, el cobre sólido puro, tiene una densidad de 8.96 gmL^{-1} a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el del tipo comercial varía con el método de manufactura, oscilando entre 8.90 y 8.94. El punto de fusión del cobre es de $1083,62 \pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1357,77\text{K}$). Su punto de ebullición normal es de $2595 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (2835K). La valencia más común es la de 2^{+} (cúprico), pero 1^{+} (cuproso) es también frecuente; la valencia 3^{+} ocurre sólo en unos cuantos compuestos inestables (Wright, J., 2003).

Cuando el Cobre termina en el suelo este es fuertemente atado a la materia orgánica y minerales. Como resultado este es difícil que entre en el agua subterránea. En el agua superficial el cobre puede viajar largas distancias, tanto suspendido sobre las partículas de lodos como en forma de iones libres.

1.7.2. Metales Antropogénicos.

1.7.2.1. Cromo ($_{24}\text{Cr}$).

Elemento químico de símbolo Cr, número atómico 24, peso atómico 51.996 gmol^{-1} ; metal que es de color blanco plateado, duro y quebradizo. Su densidad es de 7.19 gmL^{-1} a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, su punto de fusión es de $1875 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (2130 K) y su punto de ebullición es de $2665 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (2945 K).

El cromo elemental no se encuentra en la naturaleza. Su mineral más importante por abundancia es la cromita. Su estado de oxidación más alto es el 6⁺, aunque estos compuestos son muy oxidantes. Los estados de oxidación 4⁺ y 5⁺ son poco frecuentes, mientras que los estados más estables son 2⁺ y 3⁺ (Wright, J., 2003). Los iones Cr³⁺ se encuentran solubles en el agua, pero forman complejos estables a valores mayores a pH 5 como el hidróxido de cromo Cr(OH)₃ que es difícilmente soluble en agua a pH alcalino. En aguas naturales el cromo trivalente es más abundante.

1.7.2.2. *Níquel* (₂₈Ni).

Es un metal de símbolo Ni, número atómico 28, metal duro, blanco plateado, dúctil y maleable. La masa atómica del níquel presente en la naturaleza es 58.71 gmol⁻¹. Su densidad es de 8.9gmL⁻¹; así como su punto de fusión de 1455 °C (1728K) y un punto de ebullición de 2457 °C (2730K). El níquel es un elemento bastante abundante, constituye cerca de 0.008% de la corteza terrestre y 0.01% de las rocas ígneas. En algunos tipos de meteoritos hay cantidades apreciables de níquel, y se piensa que existen grandes cantidades en el núcleo terrestre.

El níquel termina en la superficie del agua cuando es parte de las aguas residuales. La mayor parte de todos los compuestos del níquel que son liberados al ambiente se absorberán por los sedimentos o partículas del suelo y llegará a inmovilizarse. En suelos ácidos, el níquel se une para aumentar su movilidad y a menudo alcanza el agua subterránea (Wright, J., 2003).

1.7.2.3. *Cadmio* (₄₈Cd).

Elemento químico relativamente raro, símbolo Cd, número atómico 48; tiene relación estrecha con el zinc, con el que se encuentra asociado en la naturaleza. Es un metal dúctil, más blando y maleable que el zinc, pero poco más duro que el estaño. Peso atómico de 112.40 gmol⁻¹ y densidad relativa de 8.65 gmL⁻¹ a 20 °C (68°F). Su punto de fusión de 320.9 °C (594,22K) y de ebullición de 765 °C (1041K) son inferiores a los del zinc.

Su estado de oxidación más común es el 2⁺. Puede presentar el estado de oxidación 1⁺, pero no es muy estable.

Las aguas residuales con Cadmio procedentes de las industrias mayoritariamente terminan en suelos. Las causas de estas corrientes de residuos son por ejemplo la producción de Zinc, minerales de fosfato y las bioindustrias del estiércol. El Cadmio de las corrientes residuales puede también entrar en el aire a través de la quema de residuos urbanos y de la quema de combustibles fósiles (Wright, J., 2003). Las fuentes de exposición al cadmio pueden ser diversas como se muestran en la *Figura 1.5*.

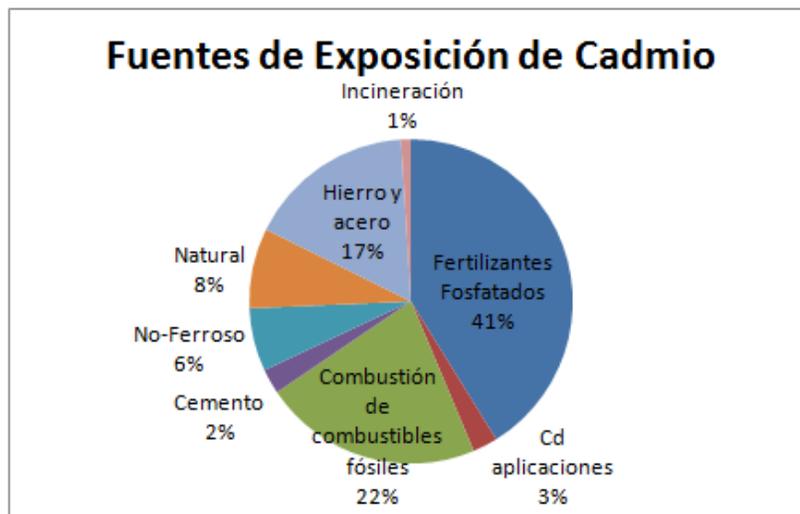


Figura 1.7. Fuentes de exposición del ser humano al Cadmio
(Brown J., M., 2011)

1.7.2.4. Plomo (${}_{82}\text{Pb}$).

Elemento químico, Pb, número atómico 82 y peso atómico 207.19 gmol^{-1} . El plomo es un metal pesado, cuya densidad relativa o gravedad específica es de 11.4 gmL^{-1} a 16 °C (61°F), de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico, se funde con facilidad, se funde a 327.4°C (600,61K) y hierve a 1725 °C (2022K).

El Plomo se encuentra en forma natural en el ambiente, pero las mayores concentraciones que son encontradas en el ambiente son el resultado de las actividades humanas. Las partículas grandes precipitarán en el suelo o la superficie de aguas, las pequeñas partículas viajarán largas distancias a través del aire y permanecerán en la atmósfera. Parte de este Plomo caerá de nuevo sobre la tierra cuando llueva. El Plomo es un elemento químico particularmente peligroso, y se puede acumular en organismos individuales, pero también entrar en las cadenas alimenticias.

1.7.3. *Macronutrientes.*

1.7.3.1. *Manganeso ($_{25}\text{Mn}$).*

Elemento químico, símbolo Mn, de número atómico 25 y peso atómico 54.938g mol^{-1} . Es uno de los metales de transición del primer periodo del bloque "d" de la tabla periódica; se encuentra entre el cromo y el hierro. El manganeso es un metal de transición blanco grisáceo, parecido al hierro. Es un metal duro y muy frágil, refractario y fácilmente oxidable.

El manganeso presenta una densidad de 7.43g mL^{-1} ; así como un punto de fusión de $1246\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1519K) y un punto de ebullición de $2061\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2334K). Presenta estados de oxidación como 2^{+} , 3^{+} , 4^{+} , 6^{+} y 7^{+} , dentro de estos los más comunes son 2^{+} , 4^{+} y 7^{+} , aunque se han encontrado compuestos con todos los números de oxidación desde 1^{+} a 7^{+} ; los compuestos en los que el manganeso presenta estado de oxidación 7^{+} son agentes oxidantes muy enérgicos.

El Manganeso puede causar síntomas de toxicidad y deficiencia en plantas. Concentraciones altamente tóxicas pueden causar inflamación de la pared celular, abrasamiento de las hojas y manchas marrones. Cuando el pH del suelo es bajo las deficiencias de Manganeso son más comunes. Dentro de los sistemas biológicos, el catión Mn^{2+} compite frecuentemente con el Mg^{2+} .

Los compuestos del manganeso existen de forma natural en el ambiente como sólidos en suelos y pequeñas partículas en el agua. Las partículas de manganeso en el aire están presentes en el polvo. Éstas usualmente se depositan en la tierra en unos pocos días.

1.7.3.2. Hierro ($_{26}\text{Fe}$).

Elemento químico de símbolo Fe, número atómico 26 y peso atómico 55.847g mol^{-1} . El hierro es el 4° elemento más abundante en la corteza terrestre (5%). Es un metal maleable, tenaz, de color gris plateado y magnético. El hierro se encuentra en muchos otros minerales y está presente en las aguas freáticas y en la hemoglobina roja de la sangre. Los cuatro isótopos estables, que se encuentran en la naturaleza, tienen las masas 54, 56, 57 y 58 g mol^{-1} . Presenta una densidad de 7.86 g mL^{-1} . El punto de fusión del hierro es de $1535\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1808K) y su punto de ebullición es de $2750\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3023K).

Los óxidos de hierro desempeñan un papel importante en los suelos, debido a su facilidad para cambiar valencia y formar complejos con numerosos productos orgánicos y minerales. Así, el hierro de los minerales puede liberarse mediante dos mecanismos: a) oxidación, transformación en Fe^{3+} y expulsión subsiguiente de redes, y b) movilización como Fe^{2+} siempre que el medio esté exento de oxígeno.

Los ácidos húmicos del suelo son fuertemente adsorbidos o complejados con el hierro en $\text{pH} > 3$. El hierro debería ser el catión principal que se uniera a la carga negativa de la materia orgánica y de las arcillas, sin embargo, el hierro tiende a hidrolizarse dentro de innumerables formas: policationes, hidróxidos y óxidos (Acevedo, O., Cruz, E., Cruz, M., Ortiz, E., 2004).

1.7.3.3. Zinc ($_{30}\text{Zn}$).

El estado del zinc en su forma natural es sólido (diamagnético). Es un elemento químico de aspecto azul pálido grisáceo y pertenece al grupo de los metales de transición. El número atómico del zinc es 30. El símbolo químico del zinc es Zn y su peso atómico es de $65,37\text{ g mol}^{-1}$. El punto de fusión del zinc es de $420,53\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($692,68\text{K}$) y el punto de ebullición es de $907,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1180K) y presenta una densidad de 7.14 g mL^{-1} mayor a la del agua. El zinc es uno de los elementos menos comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005-0.02%. Ocupa el lugar 25 en orden de abundancia entre los elementos.

El zinc se encuentra de forma natural en el aire, agua y suelo, pero las concentraciones aumentan por causas no naturales, debido a la adición a través de las actividades humanas. El agua es contaminada con zinc, debido a la presencia de grandes cantidades del metal en las aguas residuales de plantas industriales. Una de las consecuencias es que los ríos depositan fango contaminado con zinc en el fondo y sus orillas y puede también incrementar la acidez de las aguas. Algunos peces pueden acumularlo en sus cuerpos, cuando viven en cursos de aguas contaminadas con el metal, cuando entra en los cuerpos de estos peces es capaz de biomagnificarse en la cadena trófica. Grandes cantidades de zinc se pueden encontrar en los suelos y el soluble en agua localizado en el suelo puede contaminar las aguas subterráneas.

1.8. Modelos matemáticos de equilibrio químico de metales.

El uso de modelos matemáticos es de suma relevancia para hacer una representación o recreación de la forma en la que se encuentran las especies químicas de los metales en el agua.

Durante el presente trabajo se comparó la aplicación de 3 modelos matemáticos de equilibrio químico de metales que recrearon el mapa de especies químicas encontradas en el agua de los canales de Xochimilco; donde los programas utilizados fueron los siguientes:

- BLM (Biotic Ligand Model)
- WHAM 7 (Windermere Humic Aqueous Model, Versión 7).
- Visual MINTEQ.

Al final de la comparación, se escogió el mejor modelo matemático de equilibrio químico de metales para el estudio del agua de los canales de Xochimilco.

A. BLM (Biotic Ligand Model, Versión 2.2.3).

El Biotic Ligand Model o conocido por sus siglas en inglés como BLM es una herramienta para predecir la toxicidad en los sistemas acuáticos utilizando información sobre la química de las fuentes de agua locales, se puede utilizar para calcular la especiación y la biodisponibilidad. La biodisponibilidad de metales en sistemas acuáticos (es decir, la cantidad de metal que está disponible para su absorción por organismos) depende de varios factores en competencia por los iones, *Figura 1.8*.

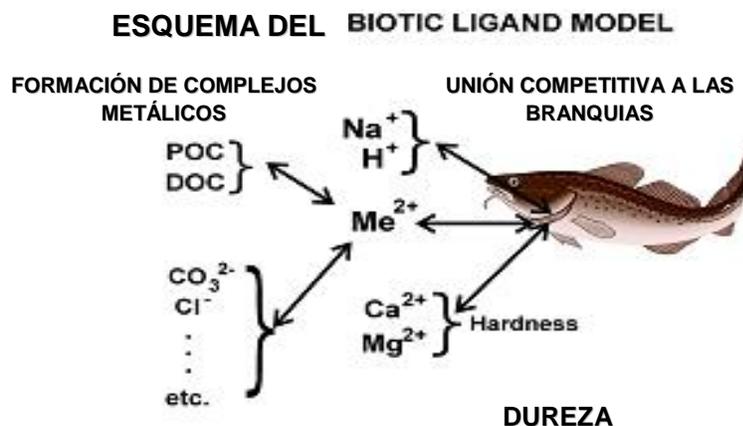


Figura 1.8. Esquema de factores existentes en competencia por los iones metálicos (Water Resources Engineering, <http://www.hydroqual.com>).

B. WHAM 7 (Windermere Humic Aqueous Model, Versión 7).

Este es el más completo de los modelos de equilibrio químico. Se utiliza el software WHAM 7 para simular y determinar la concentración de metales libres, así como los equilibrios de especiación de los mismos a partir de los datos obtenidos del análisis de metales. Posteriormente estos datos de concentración total de metales, de aniones y cationes, así como la materia orgánica disuelta definiendo la proporción de ácidos húmicos y fúlvicos (AH, AF) presente en el agua de los canales, se cargan en el software.

Esta concentración indica la proporción en la que el metal esta biodisponible y con posibilidades de ser absorbido por los organismos, es decir los niveles tóxicos del metal para los organismos. **Cabe señalar que este programa no se ha probado en sistemas acuáticos con niveles altos de materia orgánica, por lo que el presente trabajo es una oportunidad para evaluar los alcances y límites del programa.**

El esquema de cálculos de equilibrio químico analíticos se observan en la *Figura 1.10*. De esta manera, el programa determina la concentración del ión metálico o "metal libre" (biodisponible) así como las otras especies metálicas de los mismos. La capa difusa es una capa conceptual de soluto adyacente a la superficie de una macromolécula o partícula, que contiene contraiones que equilibran la carga de la fase. Sólo los iones de carga opuesta a la fase, y pares de iones neutros, pueden estar en la capa difusa.

La *Figura 1.9* muestra el área gris como la solución verdadera, en la que se encuentran disueltas las especies principales y los complejos existentes. El círculo negro representa la fase de unión en forma coloidal y el círculo azul representa la capa difusa de agua que la rodea. El área negra representa la fase de unión en forma particulada y el círculo rojo representa la capa difusa asociada con ella. La capa difusa contiene contraiones que balancean la carga de las fases de unión. La fase acuosa es la suma del área gris y la azul.

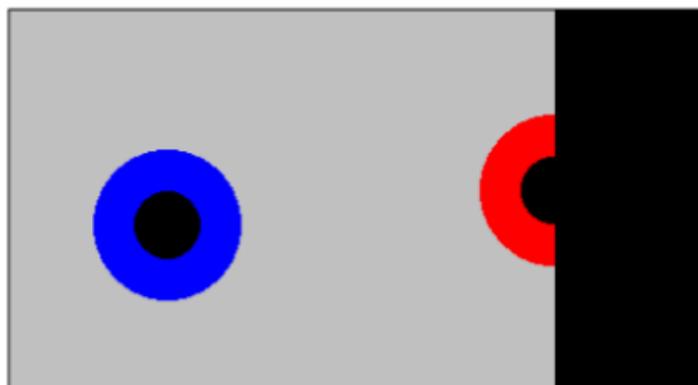


Figura 1.9. Vista conceptual de un sistema en solución mostrado por WHAM.

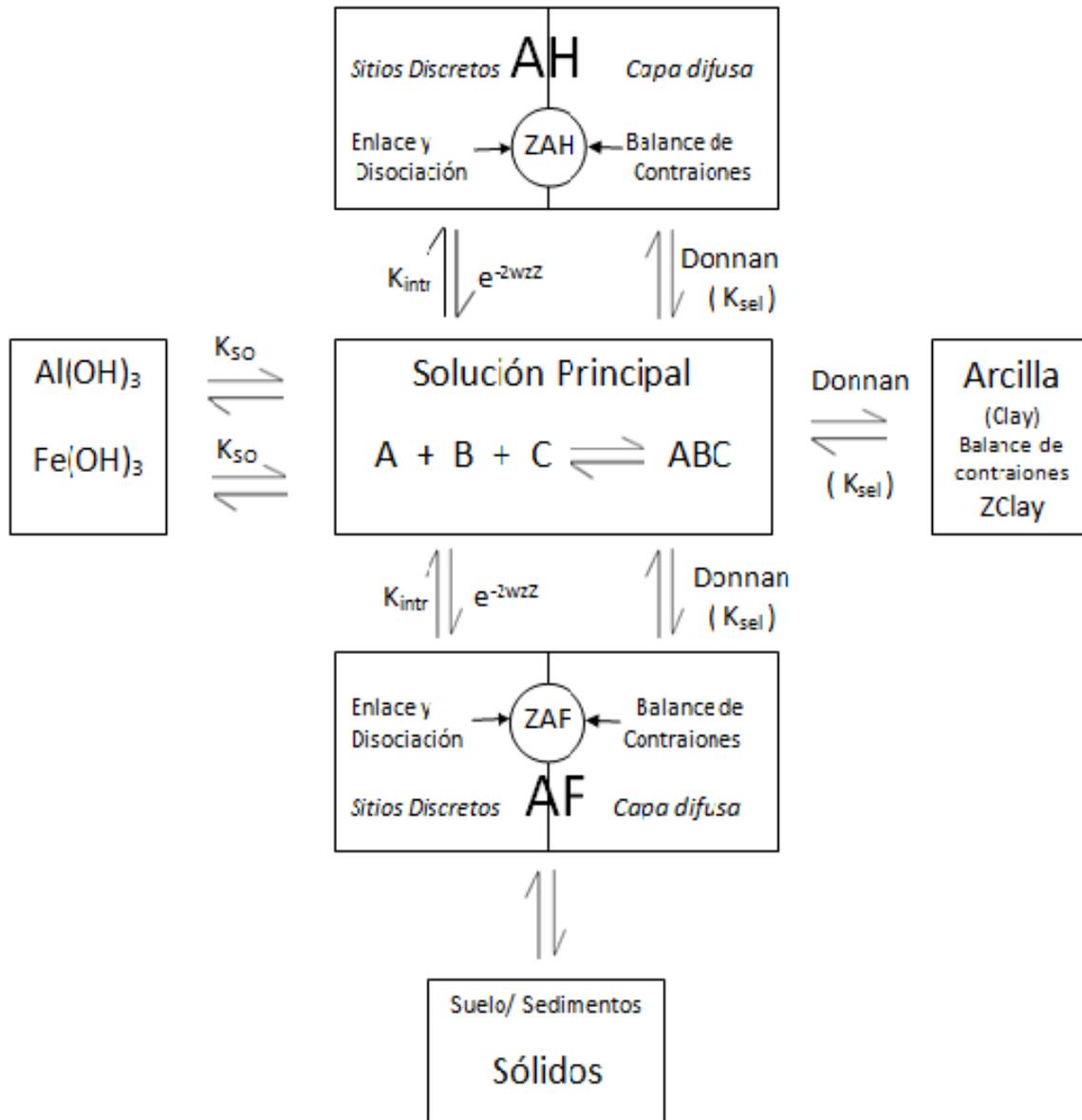


Figura 1.10. Equilibrios químicos considerados en WHAM. AF= ácidos fúlvicos, AH= ácidos húmicos. Las especies en la solución principal están en equilibrio con los sitios de enlace de los ácidos húmicos y fúlvicos, y de igual forma se encuentran en equilibrio con especies contraión en la capa difusa.

C. Visual MINTEQ

Visual MINTEQ, *Figura 1.11*, es un modelo de equilibrio químico para el cálculo de la especiación de metales, equilibrios de solubilidad, sorción, etc. para aguas naturales. Combina el estado de la técnica de la descripción de las reacciones de sorción y complejación con menús y opciones para importar y exportar datos a/desde Excel usados para el modelado de equilibrios químicos.

Visual MINTEQ

pH

Ionic strength

Activity Davies

Concentration unit

Temperature deg C

Add components

Component name

Total concentration
Molal

Fixed activity

Show organic components

Figura 1.11. Menú principal del Visual MINTEQ.

1.9. Toxicidad de Metales.

La toxicidad de los metales pesados es muy alta. Su acción directa sobre los seres vivos ocurre a través del bloqueo de las actividades biológicas, es decir, la inactivación enzimática por la formación de enlaces entre el metal y los grupos -SH (sulfhidrilos) de las proteínas, causando daños irreversibles en los diferentes organismos. Para que los metales pesados puedan ejercer su toxicidad sobre un ser vivo, éstos deben encontrarse disponibles para ser captados por éste, es decir que el metal debe estar biodisponible.

Las especies químicas metálicas de mayor interés toxicológico son los iones libres y los complejos metálicos en solución, éstos se proponen como las formas mayoritarias de incorporación por los organismos acuáticos. No obstante, en organismos bentónicos y bentopelágicos, se sugiere que la ruta principal de incorporación de metales es a través de la dieta (por la ingesta incidental de material particulado).

Los metales se han caracterizado como altamente nocivos para las comunidades acuáticas y, dependiendo de su magnitud y tiempo de exposición, pueden ocasionar numerosas alteraciones a diferentes niveles de organización biológica (Boyd, 2010; Bleackley *et al.*, 2011). En este contexto, los procesos digestivos y las condiciones químicas prevalecientes en el tracto digestivo (pH, tiempo de digestión, estado redox) determinan que metales no biodisponibles en el medio externo sean absorbidos y asimilados en el epitelio gastro-intestinal (Campbell *et al.*, 1996).

La toxicidad de un metal en los organismos acuáticos es aliviada o mitigada al ser el metal complejado por la Materia Orgánica Disuelta (MOD) o por su asociación a PS. Cuando el metal es enlazado por las sustancias húmicas ocurre principalmente en los sitios donde se encuentran presentes grupos carboxílicos y fenólicos, y en los sitios en el que los iones presentan una menor afinidad son los asociados con los grupos carboxílicos, a diferencia de los grupos fenólicos que generalmente presentan mayor afinidad para los metales (Baken *et al.*, 2011).

Capítulo 2. Objetivos.

2.1. Objetivo General.

Estudiar la distribución de especies químicas de los metales en el agua de un sistema con alto contenido de materia orgánica con modelos matemáticos de equilibrio químico para conocer su comportamiento en el sistema y que sirva como base para futuros estudios sobre la zona.

2.1.1. Objetivos Particulares.

- i. Estudiar el comportamiento espacial de los metales totales en el agua y conocer la forma en la que se encuentran dentro del sistema.
- ii. Determinar las características y sustancias húmicas de la materia orgánica en el agua, debido a que los metales se encontrarán asociados a los sitios activos presentes en ellas.
- iii. Comparar los datos obtenidos de las especies químicas de los metales con los diferentes modelos matemáticos de equilibrio químico para determinar cuál es el óptimo a usarse para el sistema de estudio.
- iv. Analizar la distribución espacial de las especies químicas de los metales a lo largo de los canales muestreados para relacionar si el entorno de cada uno influye en las especies encontradas.
- v. Analizar la distribución de los metales en las distintas fases de la columna de agua (partículas, coloides y libre) para así conocer la proporción en la que se encuentran.
- vi. Estudiar la concentración de metales libres en la columna de agua por su importancia como metal biodisponible y su efecto toxicológico en organismos.

2.2. Hipótesis.

La información que aporten los modelos de equilibrio químico de los metales en la columna de agua permitirá determinar que la concentración de metales se encontrará en mayor proporción asociada a materia orgánica disuelta y de las partículas suspendidas en comparación con las concentraciones de metales libres presentes en el agua de los canales de Xochimilco.

Capítulo 3. Procedimiento Experimental.

3.1. Descripción de los sitios del muestreo.

Se seleccionaron los puntos de muestreo basado en los siguientes criterios:

- I. Impacto Agrícola.
- II. Impacto Urbano.
- III. Zona de Descarga.

Con base en los criterios anteriores se eligieron los puntos de muestreo más representativos para realizar la toma de muestra. Se realizó la toma de muestras en los siguientes canales (sitios); **Ampampilco** (Zona de Cultivo), **Apatlaco** (Zona de Invernaderos), **Laguna de la Asunción** (Zona Urbana), **La Draga** (Zona de Descarga de Agua), los puntos son mostrados en el **Anexo I** (4 zonas con diferente influencia ambiental, con 5 sitios por zona y 2 repeticiones de cada sitio).



Figura 3.0. Mapa de la zona de Xochimilco.

- *Ampampilco*

Presenta una actividad agrícola elevada, las chinampas están dedicadas predominantemente a la producción de nopal, *Figura 3.1*, y el impacto urbano con respecto a otros sitios elegidos es menor, *Figuras 3.2, 3.3*.



Figura 3.1. Cultivo de nopales.



Figura 3.2. Canal de Ampampilco.



Figura 3.3. Canal de Ampampilco.

- *Apatlaco*

Presenta una actividad agrícola media, *Figuras 3.4 y 3.5*, en las chinampas se encuentran establecidos grandes invernaderos que están dedicados al cultivo de plantas de ornato, por lo que el uso de plaguicidas y fertilizantes es mucho más intenso que en la zona agrícola, *Figuras 3.6*; y presenta un ligero impacto urbano debido a la presencia de algunas casas.



Figura 3.4. Canal de Apatlaco.

Figura 3.5. Campos de cultivo.



Figura 3.6. Presencia de invernaderos.

- *Laguna de la Asunción*

Presenta un gran impacto urbano debido a las descargas de aguas residuales provenientes de las casas ubicadas alrededor de la laguna, *Figura 3.7*; se encuentra una capa de lirio que cubre gran parte de la superficie del agua, *Figura 3.8*, y se desprende un olor sulfuroso a la entrada a la laguna, *Figura 3.9*.



Figura 3.7. Laguna de Asunción.



Figura 3.8. Laguna de Asunción cubierta de lirio.



Figura 3.9. Canal del Infiernito (Entrada a la Laguna de Asunción).

- *La Draga*

Se puede considerar que es una zona urbana debido a que las chinampas dejaron de ser utilizadas para la actividad agrícola, por lo que ya no hay zonas de cultivo, *Figura 3.10*, hay grandes zonas de pastos y campos, *Figura 3.11*; también se encuentra la tubería de descarga de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella, *Figura 3.12*.

Figura 3.10. Canal de la Draga.



Figura 3.11. Zona de pastos.



Figura 3.12. Salida de agua proveniente de la planta de tratamiento.

3.2. Determinación de los parámetros fisicoquímicos de la zona de estudio.

Para el análisis completo de los sitios designados se tomaron los parámetros fisicoquímicos de cada uno de los puntos por sitio utilizando un multiparámetro (Hanna HI9829, *Figura 3.13*), en los que se leyeron las siguientes propiedades:

- pH.
- Conductividad.
- Temperatura.
- Oxígeno Disuelto (OD).
- Salinidad.



Figura 3.13. Multiparámetro Hanna HI9829.

3.3. Procedimientos de muestreo de agua.

En cada zona (o canal) se tomaron 5 muestras de agua por duplicado a media profundidad con una botella Van Dorn, *Figura 3.14*. El agua se vació en botellas de vidrio color ámbar perfectamente etiquetadas, *Figura 3.15*, y se almacenaron en hielo conservándose a 4°C hasta su transportación al laboratorio, *Figura 3.16*

Figura 3.14. Botella Van Dorn.



Figura 3.15. Vaciado de agua en botellas ámbar.

Figura 3.16. Almacenamiento en hielo a 4 °C.



Para la determinación de cationes y aniones en agua, se tomó una muestra de 10 mL de agua y se filtró en campo utilizando membranas de nitrocelulosa 0.45 μ m (MFTM-Millipore Membrane Filters, 0.45 μ m HAWP02500) que se inyectaron en vacutainer de 10 mL (BD Vacutainer[®] Serum, Plus Blood Collection Tubes, 367820) y se almacenaron en hielo a 4 °C hasta su transportación al laboratorio, *Figura 3.17*.



Figura 3.17. Vacutainer 10 mL y membranas nitrocelulosa de 0.45 μ m.

3.4. Procesamiento de muestras en el laboratorio.

3.4.1. Determinación de la concentración de metales totales en la columna de agua.

Al llegar al laboratorio las muestras de agua obtenidas del muestreo se filtraron utilizando un sistema, *Figura 3.18*, con membranas de polisulfona hidrofílica de 0.22 μ m de poro (HT Tuffryn[®] Polysulfone Membrane Disc Filters, Pall Corporation) y colocadas en botellas de polietileno de alta densidad de 125 mL (Nalgene[®] bottles), *Figura 3.19*, perfectamente lavadas y etiquetadas (Bautista-Zúñiga et al., 2004, **Revisar Anexo II**); las muestras son almacenadas a 4 °C para su posterior análisis.

Para la determinación de la concentración de metales en agua se tomaron 5 muestras por canal (20 muestras totales). Para el control de calidad de los análisis, se utilizaron 2 replicas del estándar certificado (SLRS-5 Riverine Water, NRC·CNRC), así como el uso de 3 blancos de agua desionizada grado MilliQ (Barnstead®, $18 \text{ M}\Omega\text{cm}^{-1}$).



Figura 3.18. Sistema de filtración para laboratorio (merckmillipore.com, 2015).



Figura 3.19. Botellas de polietileno y membranas de polisulfona de $0.22\mu\text{m}$.

A partir de conocer la forma en la que el metal total se encuentra se encuentra dentro de la columna de agua se tomó en cuenta hacer la determinación de metales en; a) agua sin partículas suspendidas (filtrada a $0.22\mu\text{m}$), y b) en agua con partículas suspendidas (***Descrito en la sección “Determinación de parámetros para el uso de los modelos de equilibrio químico”***).

- a) Para determinar la concentración de metales en agua sin partículas suspendidas (disueltos), se procedió a la filtración del agua a través de filtros con un tamaño de poro de $0.22\ \mu\text{m}$ (Zsolnay, A., 2003). Posteriormente se realizó la determinación de metales en el agua con un equipo de Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) (Marca: Thermo Scientific, Modelo: iCap Q c), del Instituto de Geofísica, *Figura 3.20 y 3.21*. Para el control de calidad de los análisis se utilizó un estándar certificado (26 element ICP Trace Metals in Drinking Water Standard A, CRM-TMDW-A, matriz 2% HNO_3 + Tr HF, pureza 99.98% - 99.9999%).

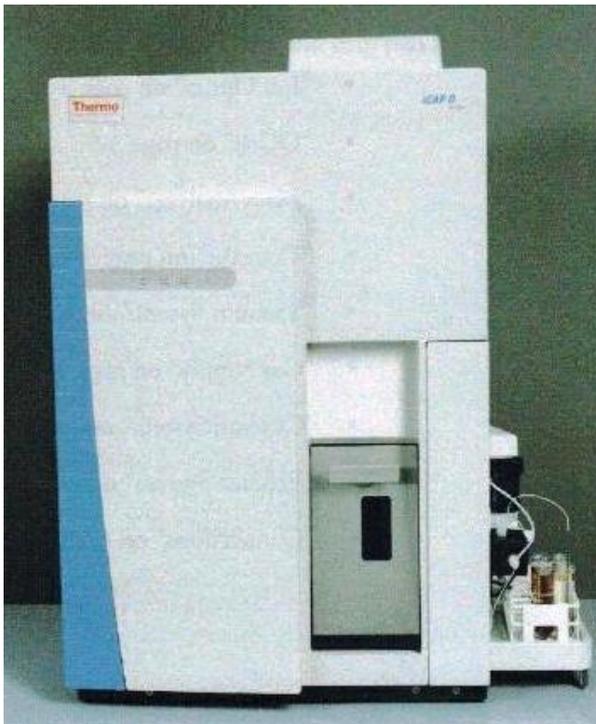


Figura 3.20. Vista frontal del ICP-MS (iCAP Q MS).

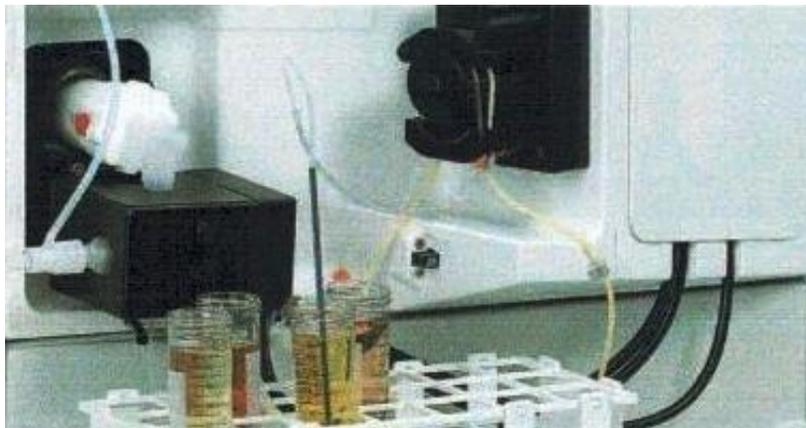


Figura 3.21. Bomba peristáltica con la muestra y el tubo de desechos.

Para la determinación de la concentración de metales en agua se tomaron 5 muestras por canal (20 muestras totales) más 2 estándares certificados (SLRS-5 Riverine Water, NRC·CNRC) y 3 blancos de agua desionizada grado MilliQ (Barnstead®, $18 \text{ M}\Omega\text{cm}^{-1}$) (*Descrito en la sección “Determinación de parámetros para el uso de los modelos de equilibrio químico”*).



Figura 3.22. Tubos de teflón y Horno de Microondas (CEM MARSX).

Para determinar la concentración de metales se utilizó un equipo de Espectrometría de Absorción Atómica (AA) (Perkin Elmer A-Analyst 800), Figura 3.24, se utilizó la técnica de Horno de Grafito. Para analizar los metales pesados en agua se realizaron curvas de calibración utilizando un estándar externo certificado (Trace Metals in Drinking Water Standard B, CRM-TMDW-B 0931527, matriz 2% HNO₃ + Tr HF, pureza 99.98% - 99.9999%).

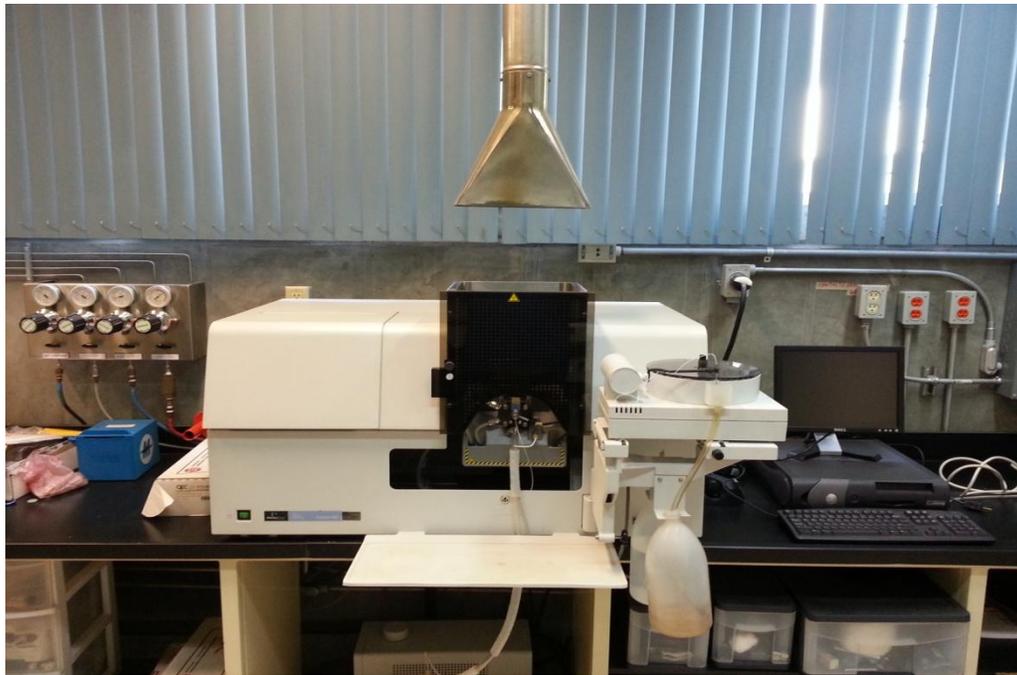


Figura 3.23. Equipo de Absorción Atómica (AA) (Perkin Elmer A-Analyst 800).

3.4.2. Determinación de parámetros para el uso de los modelos matemáticos de equilibrio químico.

Para usar los modelos matemáticos de equilibrio químico es necesaria una serie de parámetros fisicoquímicos para la determinación de la concentración de metales en sus diferentes especies químicas de forma teórica.

- Partículas Suspendidas (PS).

Para separar las partículas suspendidas (PS) de las muestras de agua, se pesaron filtros de 2.5 μm de poro (Whatman 42, Ashless, 110 mm Φ) y luego se filtraron 4 L de agua, al final de la filtración se secaron los filtros y se pesaron para determinar la cantidad de partículas suspendidas en el agua.

- Temperatura.

Para la temperatura se utilizaron los valores obtenidos en los sitios de muestreo utilizando el multiparámetro Hanna HI9829, *Figura 3.13*.

- pH.

Para el pH se utilizaron los valores obtenidos en los sitios de muestreo utilizando el multiparámetro Hanna HI9829, *Figura 3.13*.

- Aniones y Cationes disueltos en columna de agua.

Se determinaron las concentraciones de cationes y aniones presentes en el agua utilizando las muestras previamente filtradas y guardadas en los vacutainer de 10 mL *Figura 3.17*. Las concentraciones de aniones y cationes de las muestras se determinaron por Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC).

Las determinaciones se realizaron con un cromatógrafo de líquidos constituido de una bomba binaria (Marca Waters modelo 1525), un automuestreador (marca Waters modelo 717 plus) y un detector de conductividad (marca Waters modelo 432).

a) *Aniones.*

La determinación y cuantificación de aniones se realizó utilizando como fase estacionaria, una columna (IC-PaK ® marca Waters) cuyas dimensiones son: 4.6x75 mm, empleando como fase móvil una disolución constituida de [acetoniitrilo : butanol : gluconato borato de sodio : agua] en una relación [12 : 2 : 2 : 84] en modo Isocrático a un flujo de 1 ml/min.

b) *Cationes.*

La determinación y cuantificación de cationes se realizó utilizando como fase estacionaria, una columna (Metrosep C6 de 250x4.0 mm de la marca Metrohm®) empacada con partículas de 5 µm y utilizando una fase móvil constituida de HNO₃ al 1.7 mM y de ácido dipicolínico al 1.7 mM, en modo Isocrático a un flujo de 0.9 ml/min.

- Concentración total de metales en agua (agua + PS).

Para determinar la concentración total de metales en agua con partículas suspendidas, se tomaron muestras de agua y se realizó una digestión (métodos EPA SW-3015^a y EPA SW-3052 modificados) colocando 10 mL de agua en tubos de teflón añadiendo 5 mL de HNO₃ (70%, Aldrich® purified by redistillation, ≥99.999% trace metals basis), 1 mL H₂O₂ y 2 mL de HF; llevándose a un Horno de Microondas (CEM MARSX), *Figura 3.22*, al final de la digestión se realizó un postratamiento en el que se agregó 2 mL de H₃BO₄ y H₂O ID cantidad bastante para 15 mL.

Para determinar la concentración de metales se utilizó un equipo de Espectrometría de Absorción Atómica (AA) (Perkin Elmer A-Analyst 800), *Figura 3.23*, y se utilizó la técnica de Flama. Para validar el análisis de los metales pesados en agua más partículas suspendidas, se preparó una mezcla con el estándar certificado (Buffalo River Sediment Reference Material 8740, NIST <http://ts.nist.gov/srm>) y agua desionizada agregando 500 µg del estándar de referencia a 50 mL del H₂O ID para simular una muestra de agua con partículas suspendidas en concentración de 10 mgL⁻¹.

- Ácidos Húmicos (AH) y Ácidos Fúlvicos (AF).

Debido a que los modelos de equilibrio químico de los metales necesitan los datos de las concentraciones de sustancias húmicas, fue necesario primeramente, implementar el método en el laboratorio. Para ello se siguió la técnica descrita por Van Zomeren *et al.* (2007). De esta manera, se describe a continuación dicha implementación ya que no es una técnica sencilla.

Alcances del método.

La técnica que se implementó, puede cuantificar el contenido de ácido húmicos (AH) y fúlvicos (AF) en muestras acuosas con bajo contenido de sales (agua dulce) y suelos o sedimentos secos. Los intervalos de concentración que se pueden determinar con esta técnica están restringidos a la curva de calibración del analizador de carbono orgánico total (TOC), con un límite máximo de cuantificación hasta 50 mgL^{-1} .

La técnica utiliza resina de polimetilmetacrilato para la extracción en fase sólida de las sustancias húmicas. Dicha resina debe ser exhaustivamente lavada ya que fácilmente puede generar interferencias.

Principio del método.

Las sustancias húmicas son sustancias polares de ácidos orgánicos poliméricos que se derivan del humus de los suelos y de plantas terrestres y acuáticas. Generalmente comprenden de un tercio a la mitad del carbono disuelto total (COD). Por estas características polares, las sustancias húmicas pueden adsorberse y/o intercambiarse en ciertas resinas. De esta manera, este método se basa en el uso de una resina macroporosa para extraer sustancias húmicas acuáticas por extracción en fase sólida, para después extraerse selectivamente y cuantificarse en solución en un analizador de carbono orgánico total.

Resina.

La resina es un polímero de metilmetacrilato DAX-8 (Supelite® Sigma-Aldrich) de 225 Å de tamaño de poro, moderadamente polar y efectiva para compuestos arriba de 150, 000 MW.

Para el uso de la resina es necesario que se encuentre lavada lo mejor posible. (La descripción del lavado de la resina se describe en el **ANEXO III**).

Extracción de AH y AF en agua.

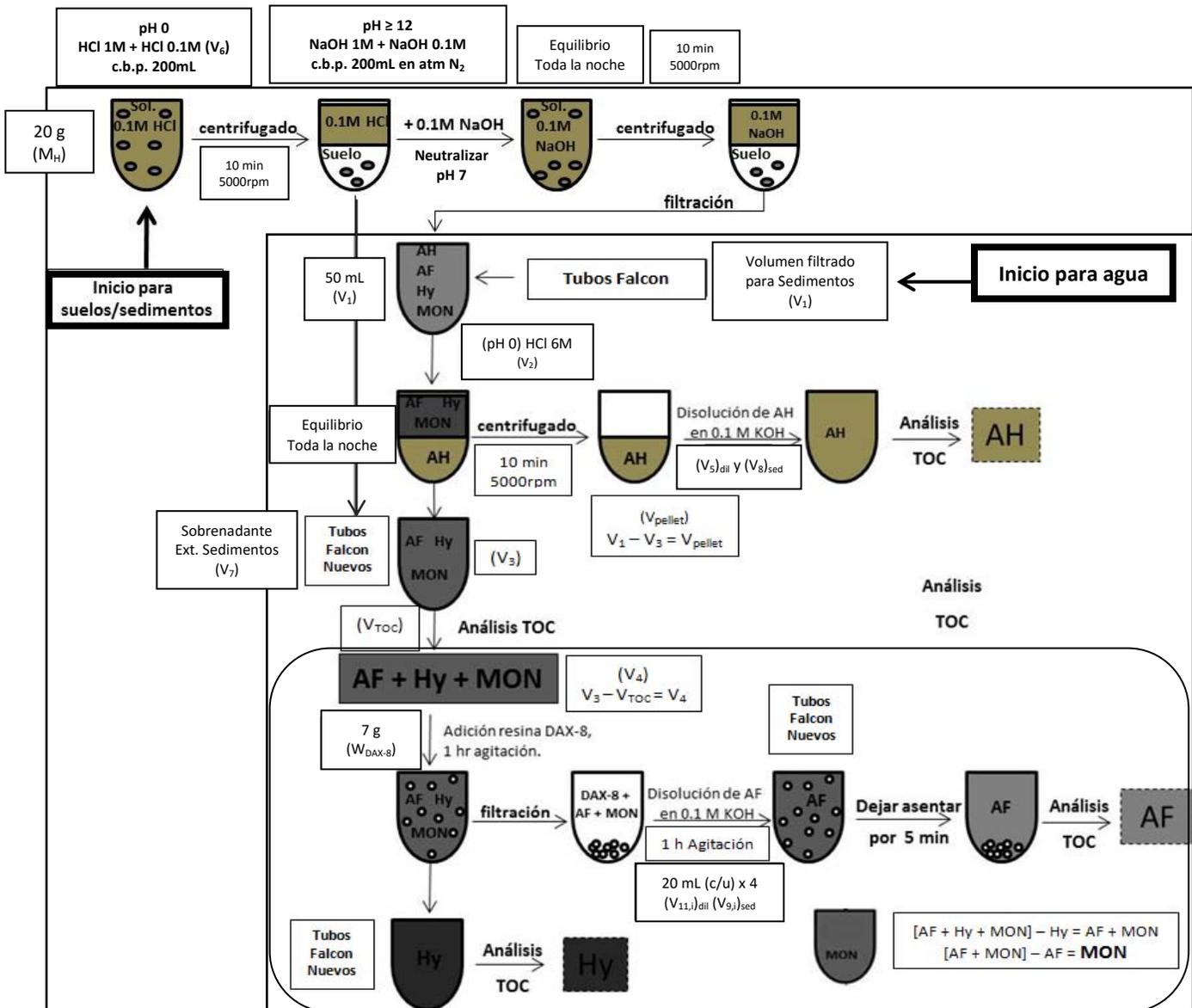


Figura 3.24. Representación esquemática (Van Zomeren et al., 2007) para la determinación de AH, AF y Hy para muestras de agua y suelos/sedimentos.

Se tomaron aproximadamente 25 mL de muestra de agua donde se midió el volumen exacto (V_0) y se le determinó el contenido de carbono orgánico total (TOC) en el agua. Para analizar el contenido de carbono orgánico total se utilizó un analizador de Carbono (Apollo 9000), para analizar el Carbono Orgánico y el Carbono Inorgánico, en ambos casos se analizó un estándar de concentración conocida (Curva de calibración revisar **ANEXO IV**).

Se tomaron 50 mL de la muestra de agua (V_1) se ajustó a pH 1 con HCl al 6 M (V_2) para precipitar los AH disueltos y se dejó la solución en reposo toda la noche, al siguiente día la suspensión se centrifugó por 10 min a 5000 rpm. El sobrenadante se decantó (V_3 ; la diferencia entre V_1 y V_3 es el volumen de agua retenido en el pellet) y parte del sobrenadante se tomó para análisis por TOC cuyo resultado es la suma de los ácidos fúlvicos (AF), ácidos hidrofílicos (Hy) y materia orgánica neutra (MON).

A una porción de 7 g de resina DAX-8 húmeda ($W_{DAX,L}$), donde el porcentaje de humedad de la resina se determinó previamente (**Revisar Anexo III**), se añadió al resto del sobrenadante ($V_4 = V_3 - \text{volumen muestreado para TOC}$) para adsorber la fracción con los AF y la MON. Posteriormente se agitó el sobrenadante con la resina por una hora, la muestra se filtró y una parte del filtrado se tomó para análisis por TOC (COD_{Hy}). Para separar los AF y la MON adsorbidos a la resina, primero se desorbieron los AF en 4 pasos de una hora cada uno utilizando 20 mL de KOH al 0.1 M ($V_{11,i}$; el volumen de cada uno de los cuatro extractos) se dejó en agitación por 1h y después en reposo por 5 min, para después decantar el extracto de la resina (4 en total).

Nota: Se debe asegurar que las soluciones de KOH y resina tengan un pH > 11, ajustando con 1 M KOH si es necesario.

La concentración de AF se determinó para los 4 extractos en el TOC. La MON se cuantificó como la diferencia del valor obtenido del TOC en V_3 (AF + MON+ Hy) menos el valor obtenido del TOC en V_4 (Hy) y TOC en V_{11i} (AF):

$MON = (AF + MON + Hy) - Hy - AF$ (de los 4 extractos).

Mientras tanto, el pellet de AH centrifugados, se disolvió en 0.1 M KOH (V_5) y se analizó por TOC. El esquema de la extracción de AH y AF se puede observar en la *Figura 3.24*.

Para el control de calidad del método, se preparó una solución con estándares de AH y AF a 50 mgCL^{-1} . Las disoluciones de mezcla de ácidos húmicos y fúlvicos se prepararon a partir de estándares de Ácidos Húmicos (IHSS Swanee River Humic Acid Standard II, 2S101H [100mg]) y Ácidos Fúlvicos (IHSS Swanee River Fulvic Acid Standard I, 1S101F [100mg]). El procedimiento descrito arriba, se repite para la solución de los estándares y se calcula el rendimiento de la técnica.

Capítulo 4. Resultados y Discusión.

4.1. Caracterización de las zonas de estudio.

Parámetros físicos y fisicoquímicos.

Los canales estudiados van desde el más ancho y largo, como lo es el de Apatlaco que es más ancho y profundo en comparación con los demás. El canal de Asunción es de tamaño medio y desemboca en una laguna que se encuentra rodeada de casas, que es alimentada de aguas domésticas, el canal no es muy profundo pero aumenta en la laguna y la transparencia es casi nula en comparación con Ampampilco. Este presenta una profundidad similar a la de Asunción pero la transparencia del agua cambia considerablemente porque tiene mayor influencia agrícola y menor influencia urbana. La Draga es un canal ancho de profundidad similar a los otros, su transparencia es mayor que la presente en Asunción pero menor en comparación con la de Ampampilco. En la Draga se encuentra la salida de agua de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella y presenta un flujo mayor al de los otros canales, además de la poca presencia de sedimento en el fondo.

A cada uno de los sitios de muestreo (4 zonas con diferente influencia ambiental, con 5 sitios por zona y 2 repeticiones de cada sitio) se les tomaron las características físicas como fueron la ubicación de los puntos de muestreo, la profundidad y el ancho del canal como se muestra en la *Tabla 4.0*; así como los parámetros fisicoquímicos como el pH, conductividad, temperatura y concentración de oxígeno disuelto como se muestra en la *Tabla 4.1.*, y el SUVA (Absorbancia Ultravioleta Específica) como se muestra en la *Tabla 4.2.*

<i>Sitio</i>	<i>Zona</i>	<i>Descripción</i>	<i>Ubicación</i>		<i>Profundidad [cm]</i>	<i>Ancho del Canal [m]</i>
	1	Frente al canal Acatitla	N19°16.0'24.0"	W99°05'34.0"	110	24
Ampampilco	2	Mitad del canal	N19°16.0'26.2"	W99°05'40.7"	100	24
Zona de cultivo	3	Mitad de canal	N19°16.0'22.7"	W99°05'31.1"	70	24
	4	Al inicio del canal	N19°16.0'29.1"	W99°05'49.1"	100	24
	5	Mitad del canal	N19°16.0'27.7"	W99°05'44.8"	80	24
	1	Cerca del canal "La Y"	N19°15.0'45.0"	W99°04'56.0"	200	50
Apatlaco	2	Mitad del canal	N19°15.0'46.7"	W99°05'04.2"	200	50
Zona de invernaderos	3	Frente a un canal	N19°15.0'48.3"	W99°05'10.2"	220	50
Zona Urbana	4	Mitad del canal	N19°15.0'49.9"	W99°05'15.9"	250	50
	5	Cerca del canal "Cruztitla"	N19°15.0'52.4"	W99°05'26.2"	120	50
	1	En la laguna	N19°16.0'08.8"	W99°06'03.5"	200	-
Asunción	2	En la laguna	N19°16.0'09.2"	W99°06'05.2"	200	-
*Lleno de lirio	3	A la entrada de la laguna	N19°16.0'09.2"	W99°06'02.4"	100	18.5
Zona Urbana	4	En el canal a la entrada de la laguna	N19°16.0'12.2"	W99°06'01.5"	110	18.5
	5	A la mitad del canal antes de llegar a la laguna	N19°16.0'13.5"	W99°05'58.8"	150	25
	1	Cerca de la salida de agua	N19°16.0'16.0"	W99°06'17.7"	170	32.5
La Draga	2	Cerca de la compuerta	N19°16.0'13.7"	W99°06'19.2"	70	32.5
*Recién dragado	3	Cerca del paso (cruce de personas)	N19°16.0'18.0"	W99°06'16.9"	50	32.5
Zona de Descarga	4	Mitad del canal	N19°16.0'21.7"	W99°06'14.8"	100	32.5
Zona Urbana	5	Inicio del canal	N19°16.0'25.3"	W99°06'12.1"	150	32.5

Tabla 4.0. Descripción de los sitios de muestreo.

Sitio	Zona	pH	Conductividad [μS]	Temperatura [°C]	Oxígeno Disuelto [mg/L]
	1	7.15	680	19.52	2.91
Ampampilco	2	7.11	684	19.63	3.5
Zona de cultivo	3	7.09	681	19.61	3.2
	4	7.18	680	19.62	4.02
	5	7.11	680	19.58	3.19
	1	7.17	951	20.06	4.47
Apatlaco	2	7.14	937	19.97	4.02
Zona de invernaderos	3	7.16	921	20.06	4.06
Zona Urbana	4	7.19	874	20.16	4.21
	5	7.03	779	19.53	3.55
	1	6.76	741	18.99	ND
Asunción	2	6.93	743	18.86	ND
*Lleno de lirio	3	6.86	741	18.99	ND
Zona Urbana	4	6.9	680	18.51	ND
	5	6.93	691	18.66	ND
	1	7.72	773	19.69	3.98
La Draga	2	7.27	1150	19.08	1.28
*Recién dragado	3	7.22	777	19.67	4.21
Zona de Descarga	4	7.15	790	19.36	4.11
Zona Urbana	5	7.14	793	18.98	3.84

Tabla 4.1. Descripción de los parámetros fisicoquímicos de los sitios de muestreo.

Con base en los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos de las zonas (canales) se realizó una comparación con análisis boxplot en donde se observa que el canal de Apatlaco presenta los mayores índices de pH, temperatura y oxígeno disuelto en comparación con los otros sitios, como se muestra en las *Figuras* de la 4.0 a 4.3.

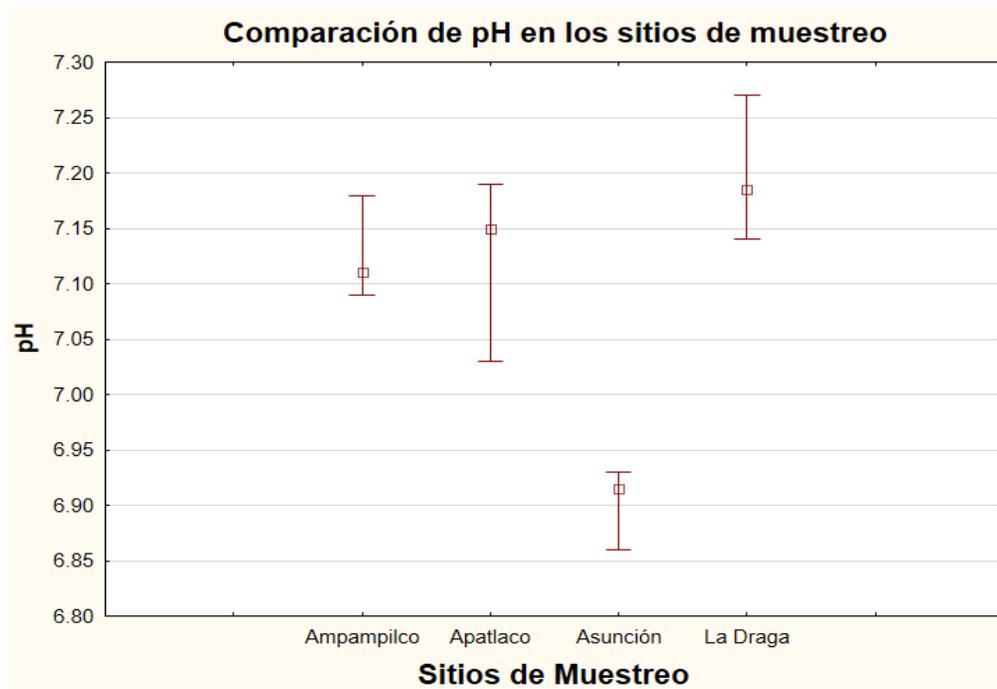


Figura 4.0. Comparación de pH de los sitios de muestreo.

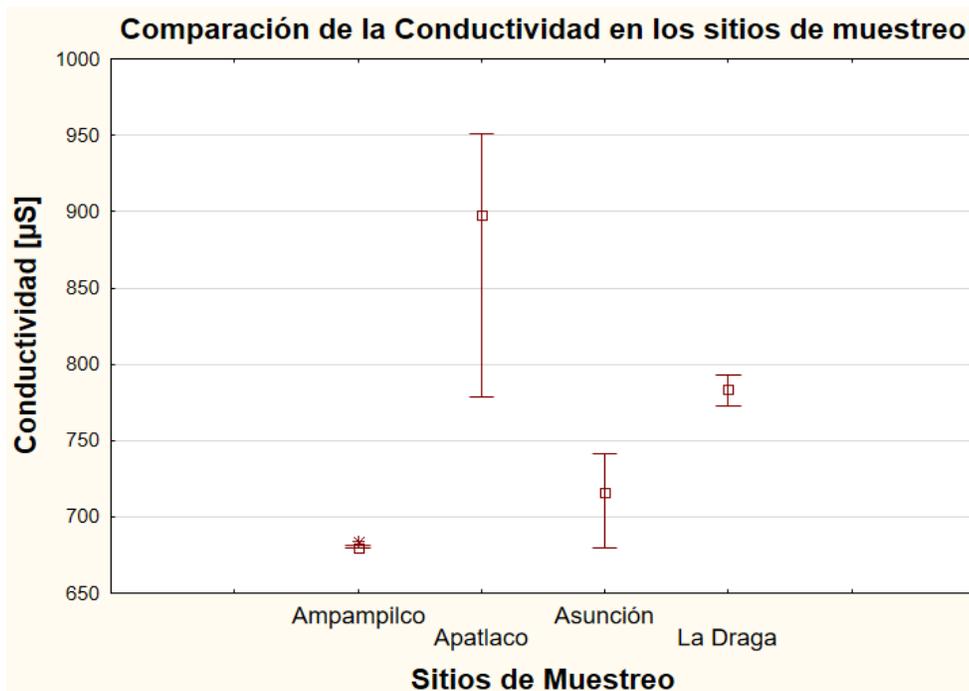


Figura 4.1. Comparación de conductividad de los sitios de muestreo.

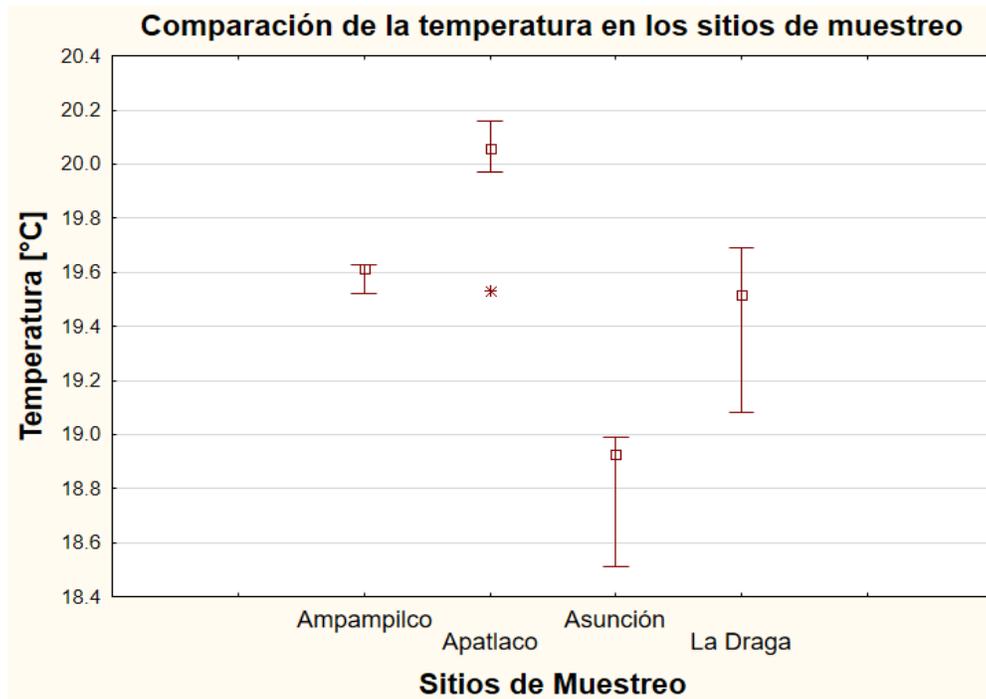


Figura 4.2. Comparación de la temperatura en los sitios de muestreo.

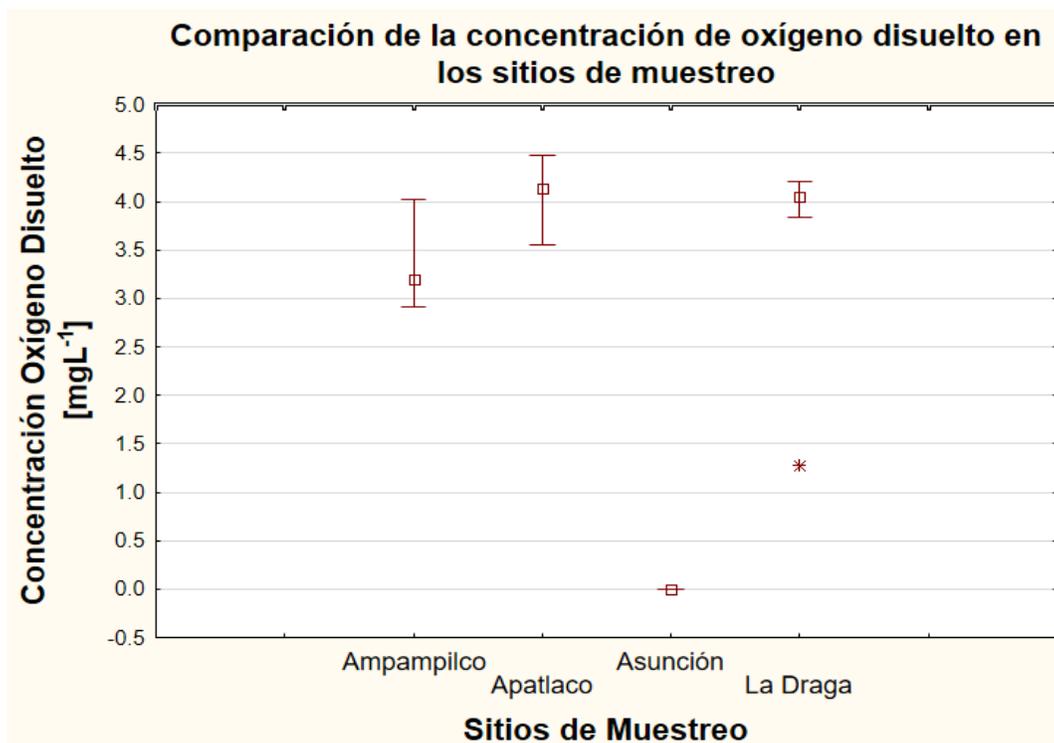


Figura 4.3. Comparación de la concentración del oxígeno disuelto en los sitios de muestreo.

Absorbancia Ultravioleta Específica (SUVA).

Este dato fisicoquímico se utiliza para dar una idea de la aromaticidad del carbono orgánico disuelto (COD) en el agua. Diferentes estudios indican que $SUVA_{254}$, por sus siglas en inglés (Specific UV Absorbance) determinada a 254nm, está fuertemente correlacionada con la aromaticidad por ciento determinado por ^{13}C NMR. El $SUVA_{254}$, por lo tanto, es un parámetro útil para estimar el contenido de sistemas aromáticos en agua (Wishaar, J., *et al.* 2003). A su vez el SUVA es un buen indicador de la fracción húmica del COD, ésta es removida por procesos de coagulación, ya que está asociada a precursores de DBPs (Ftalatos de dibutilo).

En la *Tabla 4.7* se aprecian los datos calculados para el $SUVA_{254}$ que se define como la absorbancia UV de una muestra de agua sin partículas suspendidas a una longitud de onda dada normalizada para la concentración (COD) de carbono orgánico disuelto.

En la *Figura 4.4* se observa un análisis de los datos calculados para el $SUVA_{254}$ en donde se aprecia que el canal de Apatlaco presenta los valores más altos, esto indica que la materia orgánica compuesta por las SH de esta zona contiene un alto grado de aromaticidad con dobles enlaces conjugados en su estructura, estos valores son esperados para materiales extraídos de turba, lo que es considerable debido a que en Apatlaco y Ampampilco se tiene una fuerte influencia agrícola en específico de las actividades en las chinampas donde se encuentran establecidos grandes invernaderos dedicados al cultivo de plantas de ornato. Mientras que el punto de la Draga y la Asunción tienen los valores de aromaticidad más bajos, se podría explicar debido a que el origen de la materia orgánica del lugar es principalmente sustancias no húmicas como ácidos grasos, carbohidratos, etc. de los desagües con altos contenidos de compuestos alifáticos.

Sitio	UV ₂₅₄ [m ⁻¹]	COD [mgCL ⁻¹]	SUVA ₂₅₄ [LmgC ⁻¹ m ⁻¹]	Ar (%)
Ampampilco 1	0.35	13.39	2.9	22.32
Ampampilco 2	0.34	12.61	2.7	20.88
Ampampilco 3	0.34	12.38	2.8	21.33
Ampampilco 4	0.34	11.92	2.9	22.32
Ampampilco 5	0.32	11.65	2.8	21.41
Apatlaco 1	0.90	25.13	3.6	27.72
Apatlaco 2	0.91	23.11	4.0	30.47
Apatlaco 3	0.86	21.85	4.0	30.50
Apatlaco 4	0.84	21.15	4.0	30.82
Apatlaco 5	0.68	17.90	3.8	29.36
Asunción 1	0.46	16.42	2.8	21.70
Asunción 2	0.47	17.92	2.6	20.19
Asunción 3	0.50	16.92	2.5	19.25
Asunción 4	0.45	15.50	2.6	22.44
Asunción 5	0.47	16.25	2.9	22.35
Draga 1	0.25	12.23	2.1	15.86
Draga 2	0.75	21.01	3.6	27.70
Draga 3	0.25	12.05	2.1	15.97
Draga 4	0.26	11.49	2.3	17.48
Draga 5	0.26	11.57	2.3	17.82
STD 1	10	100.8	9.9	76.37
STD 2	10	100.6	9.9	76.52

Tabla 4.2. Determinación de SUVA₂₅₄ y Ar= carbonos aromáticos a partir de la concentración de Carbono Orgánico Disuelto (COD) y la Absorbancia de UV a 254 nm.

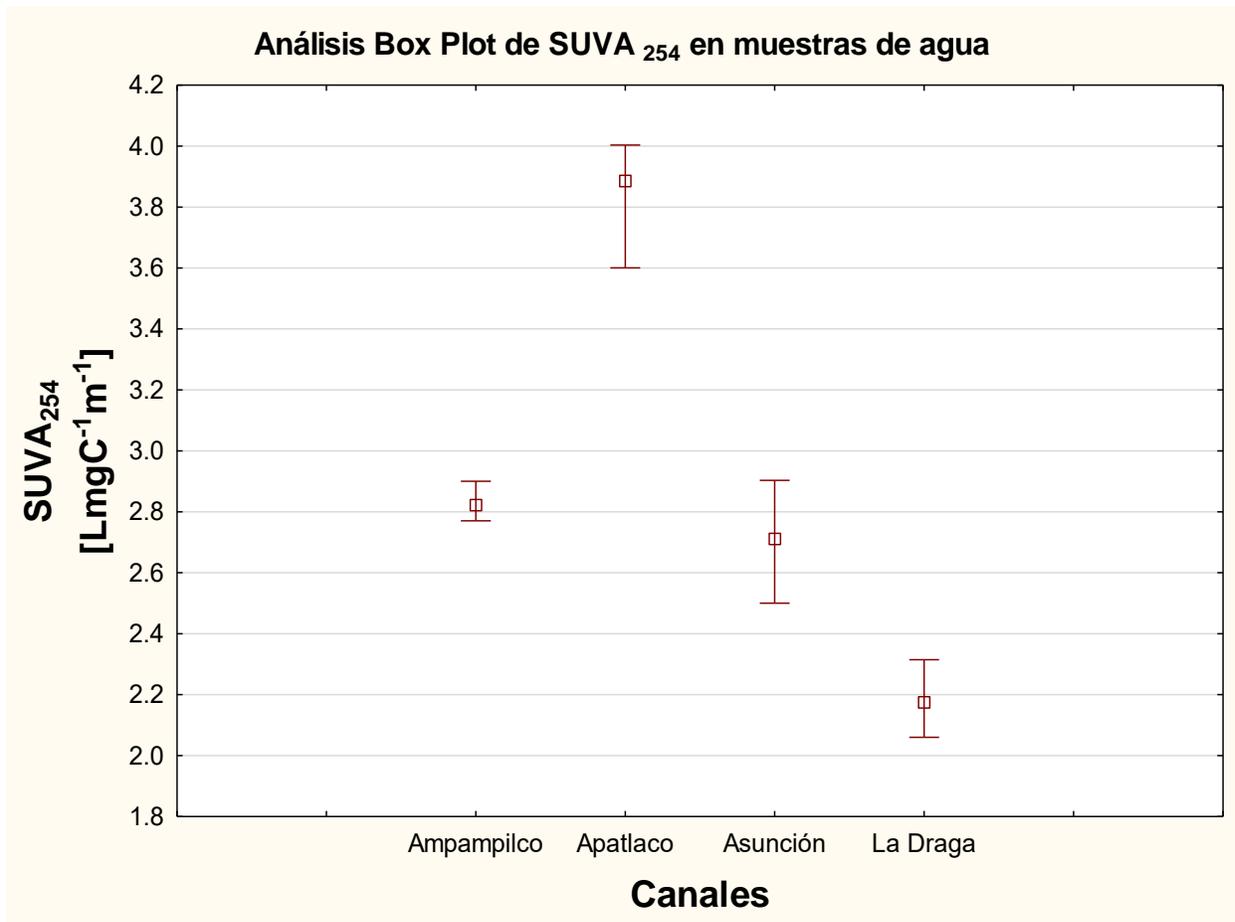


Figura 4.4. Análisis Blox Plot de los valores calculados de SUVA₂₅₄ en las muestras de agua de los canales de Xochimilco.

4.2. Parámetros para los modelos matemáticos de equilibrio químico de metales.

4.2.1. Concentración de metales totales (agua + PS).

Sitio	Concentración Total de Metales en agua + PS [μgL^{-1}]									
	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	V	Zn
<i>Ampampilco 1</i>	5.41	829.9	276.6	1290.7	182274.1	4719.1	1182.5	207.1	3158.8	10814.20
<i>Ampampilco 2</i>	2.48	785.1	140.4	502.5	44471.1	3061.1	8140.5	197.7	3194.4	4151.70
<i>Ampampilco 3</i>	0.56	789.5	89.9	1045.6	25741.8	2795.7	2002.8	51.3	3079.4	4223.88
<i>Ampampilco 4</i>	3.61	671.4	94.3	ND	35125.7	2902.3	741.4	223.3	2997.7	18605.40
<i>Ampampilco 5</i>	1.42	459.5	105.1	986.3	29163.5	3102.1	335.8	56.7	2971.7	3240.39
<i>Apatlaco 1</i>	24.72	515.8	138.8	1145.1	20015.8	5606.0	415.3	431.3	2504.6	7416.21
<i>Apatlaco 2</i>	1.44	328.9	121.5	2153.1	25439.2	5228.3	379.6	ND	3765.3	3691.49
<i>Apatlaco 3</i>	ND	385.3	115.6	732.0	19098.0	5607.1	379.7	ND	3098.6	2604.27
<i>Apatlaco 4</i>	3.18	409.2	332.9	2199.9	57358.6	9953.1	477.9	53.3	6099.1	6669.61
<i>Apatlaco 5</i>	ND	555.7	113.0	829.9	30722.3	4847.7	260.2	78.2	2988.6	3830.32
<i>Asunción 1</i>	1.10	489.0	74.4	2120.9	14705.9	2893.2	245.2	88.4	2750.1	7706.83
<i>Asunción 2</i>	3.28	196.3	59.5	860.6	26848.6	3852.3	91.8	51.0	2195.0	2317.29
<i>Asunción 3</i>	0.40	203.2	54.7	1289.5	15180.0	3305.6	276.2	233.8	1903.0	13519.71
<i>Asunción 4</i>	3.46	124.1	64.2	843.3	19510.0	3713.2	185.3	73.3	2077.7	4405.49
<i>Asunción 5</i>	1.19	73.0	105.5	889.5	91011.3	3444.2	788.4	154.2	2038.7	3561.31
<i>Draga 1</i>	5.55	102.9	72.4	1482.3	31528.2	3010.5	343.8	212.5	2149.9	6273.48
<i>Draga 2</i>	1.36	112.2	156.9	705.7	44734.7	3155.4	352.8	70.5	2590.4	4801.57
<i>Draga 3</i>	2.40	89.6	129.4	460.3	30374.7	2482.9	184.3	5.9	2240.8	ND
<i>Draga 4</i>	ND	121.0	82.0	781.0	32751.5	1969.1	229.6	92.9	2307.1	3943.06
<i>Draga 5</i>	2.21	52.4	89.8	352.3	32598.5	1865.9	327.1	96.6	2135.1	4183.34
<i>STD 1</i>	4.41	92.9	112.0	421.4	54174.5	921.8	178.9	188.1	216.4	<LD
<i>STD 2</i>	4.36	247.5	86.1	549.9	39431.8	582.9	351.0	137.2	74.7	465.3
<i>STD 3</i>	3.26	102.5	136.2	271.2	45106.9	649.8	260.3	149.7	49.7	145.8
<i>Bco 1</i>	0.01	1.23	0.37	3.58	-0.01	0.96	3.38	-0.35	-3.29	0.020
<i>Bco 2</i>	-0.01	0.67	0.13	4.60	0.04	0.82	1.87	-0.53	-6.33	0.056
<i>Bco 3</i>	0.03	3.12	0.99	5.23	0.13	1.37	5.82	-0.18	-6.79	0.056
<i>LD</i>	0.06	5.52	1.82	6.96	0.26	1.90	9.67	0.18	0.23	0.11
<i>Mínimo</i>	0.40	52.4	54.7	352.3	14705.9	1865.9	91.8	5.9	1903.0	2317.29
<i>Máximo</i>	24.72	829.9	276.6	2199.9	182274.1	9953.1	8140.5	431.3	6099.1	18605.40
<i>Promedio</i>	3.30	297.76	105.87	877.07	36437.18	3064.32	697.75	118.83	2175.79	4655.86
<i>SD</i>	5.61	263.32	69.53	555.43	37545.24	1808.94	1766.65	103.14	923.23	4154.19
<i>% Recuperación</i>	136	NR	91.4	NR	106	113	NR	96	66	75

Tabla 4.3. Contenido de metales totales agua + PS de los canales de Xochimilco analizadas por Absorción Atómica. ND= No hay dato, LD= Límite de Detección, <LD= Por debajo del límite de detección, NR= No reportado.

4.2.2. Concentraciones de metales en agua filtrada a 0.22 µm (fase coloidal).

Sitio	Concentración de Metales en Fase Coloidal [µgL ⁻¹]								
	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	V
<i>Ampampilco 1</i>	0.46	0.21	0.34	0.88	22.51	3.70	3.04	0.12	28.64
<i>Ampampilco 2</i>	0.077	0.23	0.36	0.84	17.53	1.35	3.68	0.086	30.82
<i>Ampampilco 3</i>	0.064	0.24	0.39	1.19	27.22	1.94	3.56	0.13	39.40
<i>Ampampilco 4</i>	0.66	0.22	0.37	1.05	26.99	4.49	3.21	0.10	30.67
<i>Ampampilco 5</i>	0.044	0.23	0.33	0.65	16.27	1.65	3.14	0.088	29.35
<i>Apatlaco 1</i>	0.20	0.32	1.16	0.55	26.99	4.16	3.91	0.10	75.11
<i>Apatlaco 2</i>	0.10	0.32	1.22	0.74	40.69	5.57	4.14	0.067	79.49
<i>Apatlaco 3</i>	0.073	0.35	1.30	0.85	36.22	5.14	4.11	0.078	84.93
<i>Apatlaco 4</i>	0.038	0.28	0.98	1.45	31.35	6.52	3.33	<LD (0.044)	68.43
<i>Apatlaco 5</i>	0.051	0.27	0.80	0.65	52.05	14.76	3.10	0.12	66.01
<i>Asunción 1</i>	0.50	0.34	0.67	2.61	57.87	40.92	4.63	0.20	12.90
<i>Asunción 2</i>	0.045	0.34	0.65	2.27	91.82	62.26	2.45	0.30	14.89
<i>Asunción 3</i>	0.53	0.30	0.64	2.58	56.55	38.81	2.59	0.28	14.39
<i>Asunción 4</i>	0.11	0.26	0.60	1.22	48.45	30.34	2.55	0.27	18.32
<i>Asunción 5</i>	0.092	0.24	0.52	0.87	43.52	33.94	3.61	0.14	17.70
<i>Draga 1</i>	<LD (0.035)	0.25	0.51	2.31	33.18	16.51	3.56	0.14	22.25
<i>Draga 2</i>	0.038	0.29	0.79	0.93	79.22	47.68	4.03	0.24	28.38
<i>Draga 3</i>	0.14	0.24	0.48	2.12	28.21	20.14	3.39	0.22	20.28
<i>Draga 4</i>	0.36	0.27	0.49	2.07	30.54	19.06	3.68	0.094	22.36
<i>Draga 5</i>	0.10	0.22	0.43	1.06	25.17	8.96	3.33	0.12	20.57
<i>STD 1</i>	0.01	0.05	0.22	17.20	93.33	4.54	0.43	0.07	0.33
<i>STD 2</i>	0.01	0.05	0.22	17.12	94.44	4.49	0.44	0.08	0.31
<i>Bco 1</i>	0.011	0.003	0.048	-0.197	1.108	0.225	0.137	0.016	0.032
<i>Bco 2</i>	0.024	0.010	0.062	-0.18	2.492	0.323	0.273	0.031	0.059
<i>Bco 3</i>	0.017	0.005	0.050	-0.157	3.778	0.303	0.142	0.018	0.046
<i>LD</i>	0.037	0.017	0.076	0.35	6.47	0.44	0.42	0.046	0.086
<i>Mínimo</i>	0.035	0.21	0.33	0.55	16.27	1.35	2.45	0.044	12.90
<i>Máximo</i>	0.66	0.35	1.30	2.61	91.82	62.26	4.63	0.30	84.93
<i>Promedio</i>	0.19	0.27	0.65	1.34	39.62	18.39	3.45	0.15	36.24
<i>SD</i>	0.0065	0.0036	0.0076	0.020	1.34	0.052	0.077	0.0081	0.014
<i>%</i>	115	100	106	98	103	104	91	93	100
<i>Recuperación</i>									

Tabla 4.4. Contenido de metales en fase coloidal de los canales de Xochimilco analizadas por ICP-MS. ND= No hay dato, LD= Límite de Detección, <LD= Por debajo del límite de detección, NR= No reportado.

4.2.3. Concentración de aniones y cationes en agua filtrada (sin PS).

Los resultados que a continuación se presentan fueron realizados en el Laboratorio de Agua perteneciente al Departamento de Edafología en el Instituto de Geología de la UNAM.

Muestra	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	Concentración (mgL ⁻¹)				
Draga 1	84.17	0.38	17.85	37.45	24.07
Draga 2	132.84	0.75	25.65	62.07	41.59
Draga 3	83.66	1.04	18.44	316.38	33.54
Draga 4	84.87	0.44	18.01	38.39	24.66
Draga 5	84.74	0.46	18.39	39.04	24.87
Asunción 1	69.19	10.76	17.87	39.25	25.91
Asunción 3	68.95	10.63	18.39	39.16	25.61
Asunción 3	69.20	10.71	17.72	38.45	25.11
Asunción 4	64.82	12.45	16.46	34.11	22.43
Asunción 5	68.70	9.68	17.08	34.03	22.13
Apatlaco 1	100.37	1.35	18.43	49.11	38.44
Apatlaco 2	98.27	1.44	18.34	48.66	38.01
Apatlaco 3	96.54	1.39	18.26	47.85	37.12
Apatlaco 4	92.73	1.63	17.83	46.01	35.60
Apatlaco 5	79.12	3.07	17.00	40.13	31.16
Ampampilco 1	71.28	1.28	17.39	111.24	24.80
Ampampilco 2	70.99	1.29	15.79	34.34	23.05
Ampampilco 3	71.83	0.84	15.88	34.57	23.32
Ampampilco 4	70.17	2.53	16.37	34.50	23.09
Ampampilco 5	71.06	0.99	15.43	33.93	22.93
LD	0.05	0.05	0.05	0.10	0.10

Tabla 4.5. Concentración de cationes en muestras de agua de los canales de Xochimilco. LD= Límite de detección.

Muestra	F ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
	Concentración (mgL ⁻¹)						
Draga 1	ND	103.02	107.96	ND	67.32	ND	80.46
Draga 2	ND	182.17	175.88	ND	41.14	ND	126.20
Draga 3	ND	ND	630.81	ND	82.40	ND	80.74
Draga 4	ND	103.16	110.51	ND	65.81	ND	81.03
Draga 5	ND	95.98	108.48	ND	68.94	ND	82.35
Asunción 1	ND	136.72	132.91	ND	7.64	ND	49.23
Asunción 3	ND	155.35	130.25	ND	ND	ND	46.95
Asunción 3	ND	147.63	135.29	ND	ND	ND	48.99
Asunción 4	ND	145.00	134.60	ND	ND	ND	55.41
Asunción 5	ND	112.83	160.44	ND	1.39	ND	63.69
Apatlaco 1	ND	138.75	174.01	ND	5.16	ND	107.34
Apatlaco 2	ND	134.37	167.70	ND	5.08	ND	107.56
Apatlaco 3	ND	135.42	167.25	ND	4.40	ND	105.01
Apatlaco 4	ND	133.21	161.31	ND	7.62	ND	97.32
Apatlaco 5	ND	131.11	140.77	ND	12.42	ND	82.06
Ampampilco 1	ND	51.90	262.87	ND	22.38	ND	70.21
Ampampilco 2	ND	99.90	136.98	ND	17.99	ND	72.32
Ampampilco 3	ND	90.71	142.33	ND	14.70	ND	73.11
Ampampilco 4	ND	106.00	130.82	ND	17.12	ND	71.91
Ampampilco 5	ND	95.51	138.07	ND	21.18	ND	72.56
LD	0.10	0.10	0.10	0.50	0.50	0.50	0.50

Tabla 4.6. Concentración de aniones en muestras de agua de los canales de Xochimilco. LD= Límite de detección, ND= No hay dato.

4.2.4. Concentración de sustancias húmicas disueltas.

La *Tabla 4.7* muestra la concentración de AH, Hy, AF, MON y la suma de todos obtenidos en la implementación del método de extracción. Las concentraciones de AH en comparación fueron casi uno o dos órdenes de magnitud por debajo de las de AF y Hy.

Sitio	AH [mgCL ⁻¹]	Hy [mgCL ⁻¹]	AF [mgCL ⁻¹]	MON [mgCL ⁻¹]	SUMA [mgCL ⁻¹]
Ampampilco 1	1.369	12.62	16.51	ND	30.24
Ampampilco 2	1.992	7.78	20.16	ND	29.69
Ampampilco 3	1.384	19.97	33.96	ND	55.03
Ampampilco 4	1.392	12.27	17.94	ND	31.37
Ampampilco 5	1.381	12.78	17.48	ND	31.42
Apatlaco 1	1.138	14.63	39.71	ND	55.02
Apatlaco 2	1.153	11.14	18.94	ND	30.78
Apatlaco 3	1.254	14.99	23.27	ND	39.08
Apatlaco 4	1.210	14.88	18.79	ND	34.48
Apatlaco 5	1.177	12.24	17.59	ND	30.63
Asunción 1	1.332	13.56	37.79	ND	52.39
Asunción 2	2.326	184.45	174.10	ND	360.54
Asunción 3	1.265	174.72	198.18	ND	373.88
Asunción 4	1.314	203.09	200.70	ND	404.81
Asunción 5	2.405	202.79	204.28	ND	409.17
Draga 1	1.259	161.70	198.96	ND	361.71
Draga 2	1.131	218.57	136.14	ND	355.46
Draga 3	1.165	158.92	181.50	ND	341.38
Draga 4	1.152	172.14	183.89	ND	356.98
Draga 5	1.259	181.70	186.62	ND	369.37
STD 1	18.542	28.88	46.46	ND	92.621
STD 2	21.697	23.95	39.63	ND	83.989
% Recuperación promedio	37.7	NR	86.1	ND	--

Tabla 4.7. Concentración de sustancias húmicas, AH= ácidos húmicos, Hy= ácidos hidrofílicos, AF= ácidos fúlvicos y MON= materia orgánica neutra (hidrofóbica); en muestras de agua de los canales de Xochimilco. NR= No reportado, ND= No Detectado.

Cabe aclarar que de acuerdo a Van Zomeren (Van Zomeren *et al.*, 2007) la recuperación de los AH disminuye marcadamente cuando las concentraciones están por debajo de 50 mgL^{-1} que coincide con los valores de recuperación del 30% encontrados en este estudio. Las bajas concentraciones de la fracción no recuperada de AH son predominantemente determinadas como parte de la fracción AF, esto es consistente con las propiedades de cada una de las fracciones dado por la estabilización de las moléculas a través de interacciones hidrófobas y puentes de hidrógeno que se traduce en una alta afinidad de ambas fracciones de ser adsorbidas por la resina DAX-8.

Las bajas concentraciones obtenidas para AH en las muestras de agua demuestran tendencias esperadas en las que en el sedimento se encuentran en mayor proporción debido a que los AH son agregados de mayor tamaño (más viejos), a diferencia de los AF que son agregados de menor tamaño (más jóvenes) (Martín, M. 2011).

La formación de agregados de AH son una función del pH, la fuerza iónica y la concentración de metales; la concentración de coloide es un factor importante en la agregación y floculación de los AH (Sutton, R. *et al.*, 2005). La velocidad de agregación de coloides depende en gran medida de la frecuencia de colisión entre ellos, esto disminuye a bajas concentraciones de AH. La precipitación incompleta observada de AH a bajas concentraciones sugiere una agregación de AH limitada, lo que puede deberse a una frecuencia de colisión de coloides insuficiente.

A pesar de la baja recuperación de los AH, estos valores no fueron modificados en los parámetros de los modelos de equilibrio químico de los metales, ya que no cambiaron sustancialmente los valores obtenidos al final por los softwares ya que para que se observara una diferencia, las concentraciones de AH deben ser órdenes de magnitud mayores.

4.3. Estudio comparativo con los modelos matemáticos de equilibrio químico de metales.

Los modelos matemáticos estudiados, fueron seleccionados porque toman en consideración el equilibrio químico con las sustancias húmicas. Para comparar los entre si se utilizaron los datos determinados de los parámetros analizados en el agua como: la concentración total de metales, de aniones y cationes, de AH y AF y de carbono orgánico disuelto (COD). Usando los parámetros anteriores se realizó una comparación entre los 3 modelos, WHAM, BLM y Visual MINTEQ; al hacerlo se corrieron los modelos para obtener la concentración de ión libre o biodisponible y se realizó una comparación.

Cabe destacar que el modelo BLM sólo trabaja con 4 metales, los mismos que se utilizaron para hacer la comparación con los otros dos; del resultado obtenido al realizar la comparación el BLM fue el que más se correlacionó con los otros dos modelos, tanto con WHAM en tres metales como lo fueron cadmio, plomo y cobre, mientras con Visual MINTEQ en cobre y zinc.

Se realizó una comparación entre los valores obtenidos para metal libre o ión libre (biodisponible) entre los tres modelos usando 4 metales, son reportados por los tres modelos (Cd, Cu, Pb y Zn). La *Tabla 4.8* y la *Figura 4.5* muestran una mayor correlación entre los modelos WHAM y BLM para los metales y una menor correlación se da entre WHAM y Visual MINTEQ.

Variable	Correlations (Comparación Modelos 4 metales FINAL.sta)		
	WHAM	MINTEQ	BLM
WHAM	1.000000	0.644567	0.972200
MINTEQ	0.644567	1.000000	0.703799
BLM	0.972200	0.703799	1.000000

Tabla 4.8. Correlación entre los tres modelos.

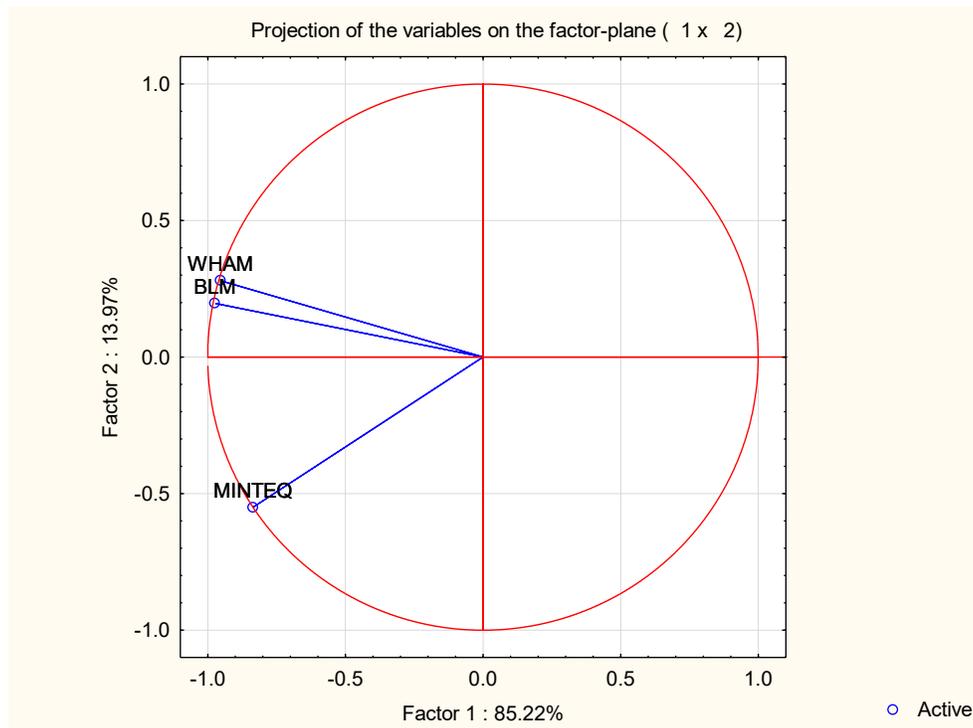


Figura 4.5. Correlación entre los tres modelos.

Tanto el modelo MINTEQ como WHAM se consideran modelos de equilibrio químico, mientras que el modelo BLM se considera de toxicidad, pero arroja datos de biodisponibilidad y especiación al igual que los otros, pero no de una forma completa. En la *Tabla 4.9* se observan las diferencias entre los modelos de equilibrio químico.

Característica	MINTEQ	WHAM
Base de datos Termodinámica	Si	Si
Reacciones añadidas por el usuario	Si	Si Difícil
Correcciones de actividad (iones inorgánicos)	Davies	Extendida Debye-Huckel
Corrección de temperatura	Si	Si
Especiación de materia orgánica natural, incluyendo complejos metálicos	Discreta sencilla o Compuesto por el modelo ligando	Discreto plus Donnan (Base de datos extensa)
Adsorción en superficies naturales	Actividad K_d , Langmuir, Freundlich, intercambio de ión, constante de capacitancia, capa difusa, 3- capas	Intercambio de ión sólo en la versión para suelo
Solubilidad en fase sólida o gaseosa	Si	Limitada a $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$ sólo en la versión para suelo
Redox	Si	No
Interfaz de usuario	Si Sólo texto	No
Guía de usuario disponible	Si	No
Código fuente disponible	Si	No
Lenguaje de programación	FORTRAN77	BASIC

Tabla 4.9. Comparación de características de modelos de equilibrio químico seleccionado para la especiación de metales (Paquin, P., 2003).

Características	Modelos		
	WHAM	MINTEQ	BLM
pH	Si	Si	Si
Fuerza Iónica	Si	Si	Si
Diferencia de Carga	Si	Si	No
Concentración Total de Especies	Si	Si	Si
Actividad del Metal Libre	Si	Si	No
Actividad de cada complejo	Si	Si	No
Amplia variedad de Metales	Si	Si	No, Solo 4
Índices de Saturación	No	Si	No
Equilibrios de Masa	Si	Si	No
BL-M (LC50)	No	Si	Si
Fracciones del Metal asociado a MO	Si	Si	Si
Metal Biodisponible	Si	Si	Si

Tabla 4.10. Comparación de resultados obtenidos de cada uno de los tres modelos.

El BLM fue desarrollado para incorporar la especiación de metales y los efectos protectores de la competencia de cationes en la predicción de la biodisponibilidad de los mismos metales junto con la toxicidad. El BLM está basado en un modelo conceptual del modelo de interacciones superficiales de branquias propuesto por Pagenkopf (1983)¹, *Figura 4.6*. El BLM es usado para evaluar la biodisponibilidad y toxicidad de metales en la columna de agua, inicialmente diseñado para determinar la toxicidad de cobre y plata en peces de agua dulce e invertebrados, por lo que se considera más un clásico modelo que evalúa la toxicidad.

El BLM usado para predecir la toxicidad de metales está basado en otro modelo, además se le han ido realizando modificaciones incorporando aproximaciones sobre interacciones de tipo metal-materia orgánica utilizadas por el WHAM. Debido a las características del BLM no se tomará como modelo base para el desarrollo del presente trabajo, a excepción de los datos determinados por el mismo modelo para la evaluar la toxicidad.

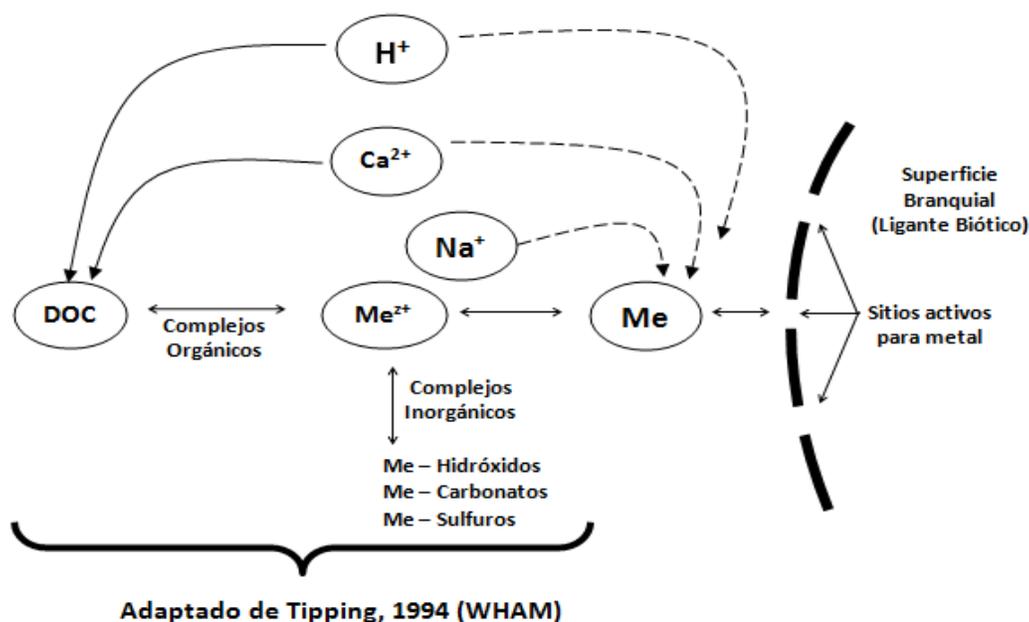


Figura 4.6. Diagrama conceptual del Modelo BLM de Pagenkopf en 1983 (Paquin, P., 2003).

La disyuntiva entre la utilización de los modelos MINTEQ y WHAM se resuelve al hacer una comparación de las características de cada uno de ellos y así determinar cuál es mejor para el sistema que se encuentra en el agua de los canales (Revisar *Tabla 4.9*).

MINTEQ es un poderoso modelo de equilibrio químico que se mantiene suministrado con bases de datos de constantes termodinámicas de forma activa. Por otro lado WHAM se especializa en interacciones entre metales y Materia Orgánica Natural (MON) en ambientes acuosos, WHAM es menos completo que MINTEQ, sin embargo es el más idóneo para aplicarse donde las interacciones entre metales y materia orgánica natural son importantes o considerables (Paquin, P., 2003).

El WHAM fue desarrollado para simular el equilibrio químico de aguas, sedimentos, y suelos dominados por la materia orgánica natural (Tipping 1994), *Figura 4.7*. En él las interacciones metal-materia orgánica son simuladas como una combinación de interacciones químicas y electrostáticas. Los enlazamientos competitivos de metales incluyen interacciones monodentadas y bidentadas con las sustancias húmicas. El enlazamiento químico puede ser modificado por interacciones electrostáticas, dependiendo de la carga neta de las moléculas orgánicas y de la fuerza iónica de la simulación del sistema acuático. Estas capacidades, junto con la calibración extensiva de conjuntos de datos publicados, hacen que el WHAM sea el modelo más completo hasta la fecha para la simulación de la química de metal donde las interacciones con la materia orgánica natural son importantes.

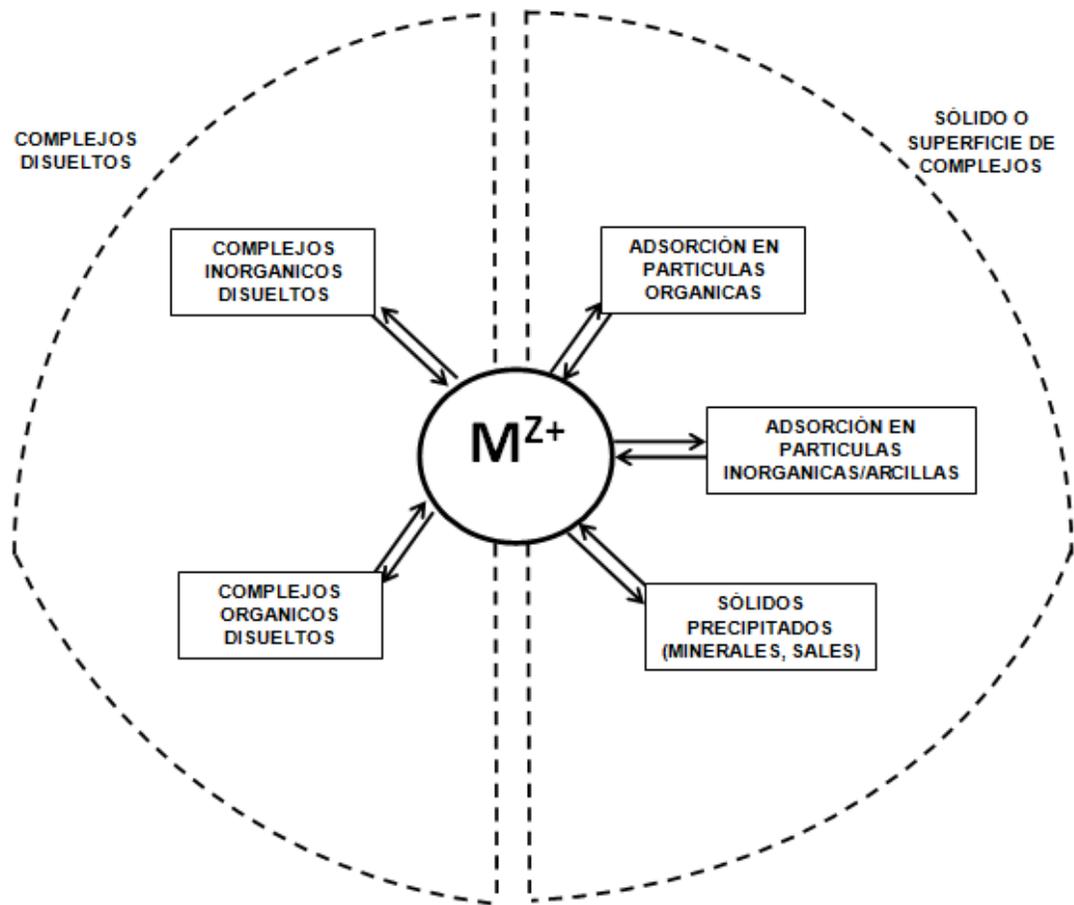


Figura 4.7. Diagrama esquemático de un modelo de equilibrio químico para la especiación de metales de Tipping en 1996 (Paquin, P., 2003).

Con base en la comparación punto por punto de las características de los modelos, donde muchas similitudes y algunas obvias importantes diferencias, se utilizará el WHAM para analizar el equilibrio químico que se presenta en el agua de los canales.

Capítulo 5. Distribución de las especies químicas de los metales en agua de los canales de Xochimilco.

5.1. *Distribución espacial de la concentración total (agua + PS) de los metales.*

Los resultados obtenidos de las concentraciones totales de metales (agua + PS) de los sitios se dividió en 3 categorías para su estudio: metales antropogénicos (Ni, Pb, Cr y Cd), geogénicos (V, Cu y Co), y los elementos denominados macronutrientes (Fe, Mn y Zn). Las figuras 5.0 a 5.2, muestran la distribución espacial de las 3 categorías de los metales. En ellas se observa que el canal de Ampampilco presenta los mayores índices de metales antropogénicos como el níquel como se observa en la *Figura 5.0*, esto debido a que el canal de Ampampilco en gran parte tiene influencia por la agricultura lo que indicaría que en la zona son usados productos enfocados a enriquecer el suelo de las chinampas.

En el caso de los metales geogénicos, se encuentran distribuidos de forma homogénea a lo largo de los cuatro canales en donde se destaca una mayor concentración de vanadio en cada uno de los sitios, por otra parte el cobre se encuentra en grandes concentraciones en el canal de Asunción como se aprecia en la *Figura 5.1*, mientras que en el canal de Ampampilco se observa mayores concentraciones de cobalto en comparación con los otros canales.

Para la distribución de macronutrientes que se observa en la *Figura 5.2* muestra que el hierro se encuentra en grandes concentraciones en comparación con lo que se observa para manganeso y zinc, el canal de Ampampilco es el que presenta mayores concentraciones tanto de hierro como de zinc y el canal de Apatlaco presenta cantidades mayores de hierro y manganeso. Todo lo anterior indica que el canal de Ampampilco es el que presenta mayores concentraciones de metales totales, lo que es viable, debido a que el canal tiene gran influencia de los suelos agrícolas de las chinampas que son enriquecidos para mejorar las producciones.

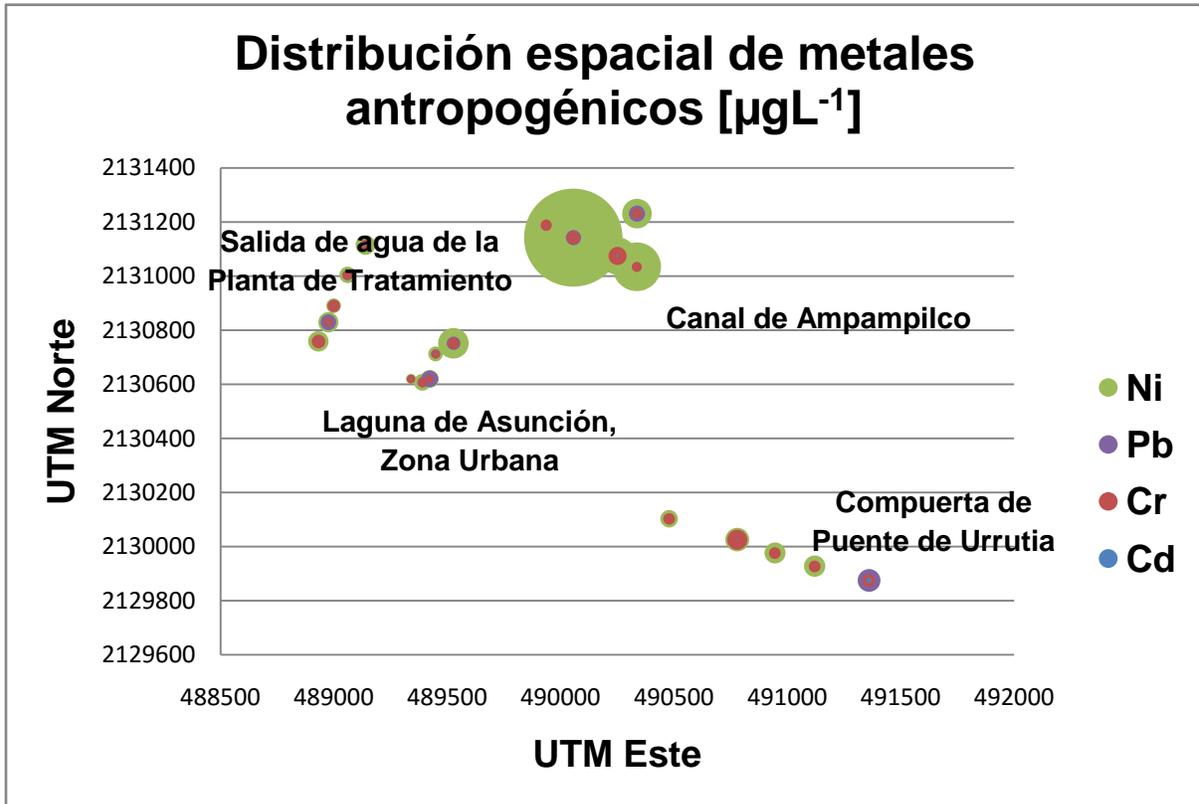


Figura 5.0. Distribución espacial de metales antropogénicos en el agua de los canales de Xochimilco (en sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator UTM).

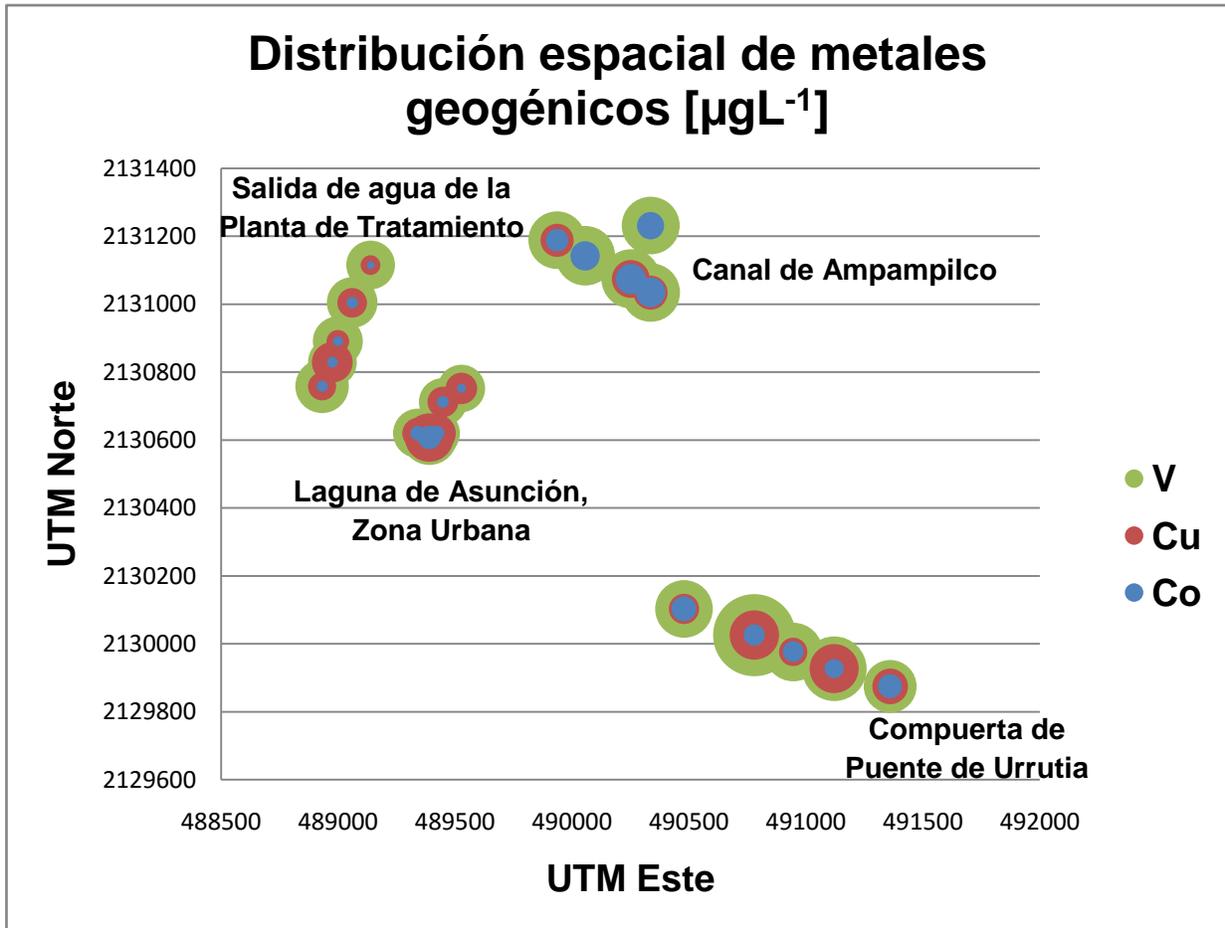


Figura 5.1. Distribución espacial de metales geogénicos en el agua de los canales de Xochimilco (en sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator UTM).

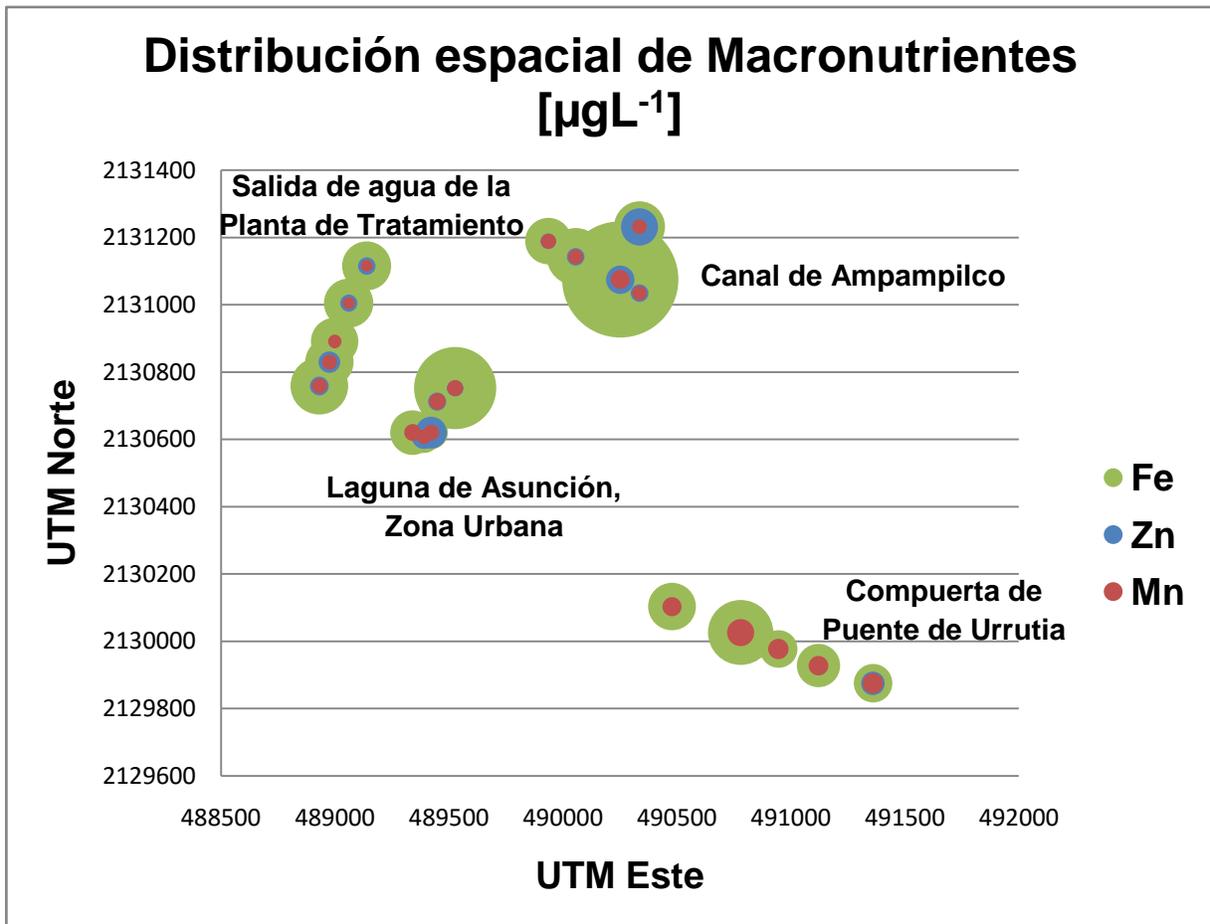


Figura 5.2. Distribución espacial de macronutrientes en el agua de los canales de Xochimilco (en sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator UTM).

5.2. Distribución de las especies químicas de los metales en la columna de agua determinado con WHAM.

Estudio del total de las especies químicas de metales en columna de agua.

Los metales pueden presentarse en el agua, en los sedimentos y en los suelos de forma disuelta, especies coloidales y en especies unidas a partículas; todo esto en función de las condiciones ambientales particulares. Las especies del metal disuelto incluyen el ion libre no hidratado o hidratado de metal (M^{n+}), así como complejos orgánicos e inorgánicos disueltos. Los metales en fase coloidal se asocian principalmente con oxihidróxidos de Fe y Mn amorfos o sustancias húmicas. Los metales formando partículas pueden encontrarse como formas químicas discretas (precipitados), adsorbidos sobre superficies sólidas de óxidos hidratados y sustancias orgánicas, o como compuestos intermedios (coprecipitados) (Reuther, R., 1999).

Los valores de concentración total determinados para cada metal, *Figura 5.3*, se observa que el Fe se encuentra en mayor concentración en el agua de los canales por encima de los 30 mgL^{-1} , el Zn es el 2º metal se encuentra en mayor concentración por encima de los 5 mgL^{-1} seguido del Mn que en promedio se encuentra en los 3 mgL^{-1} . Según la NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, *Tabla 5.0*, muestra que los metales determinados en el agua de los canales de Xochimilco se encuentran dentro de los límites permitidos, a excepción de los valores de níquel para el canal de Ampampilco, lo que indica que al ser un sitio predominantemente agrícola el uso de productos para el abono enriquecidos con níquel son de gran uso en la zona.

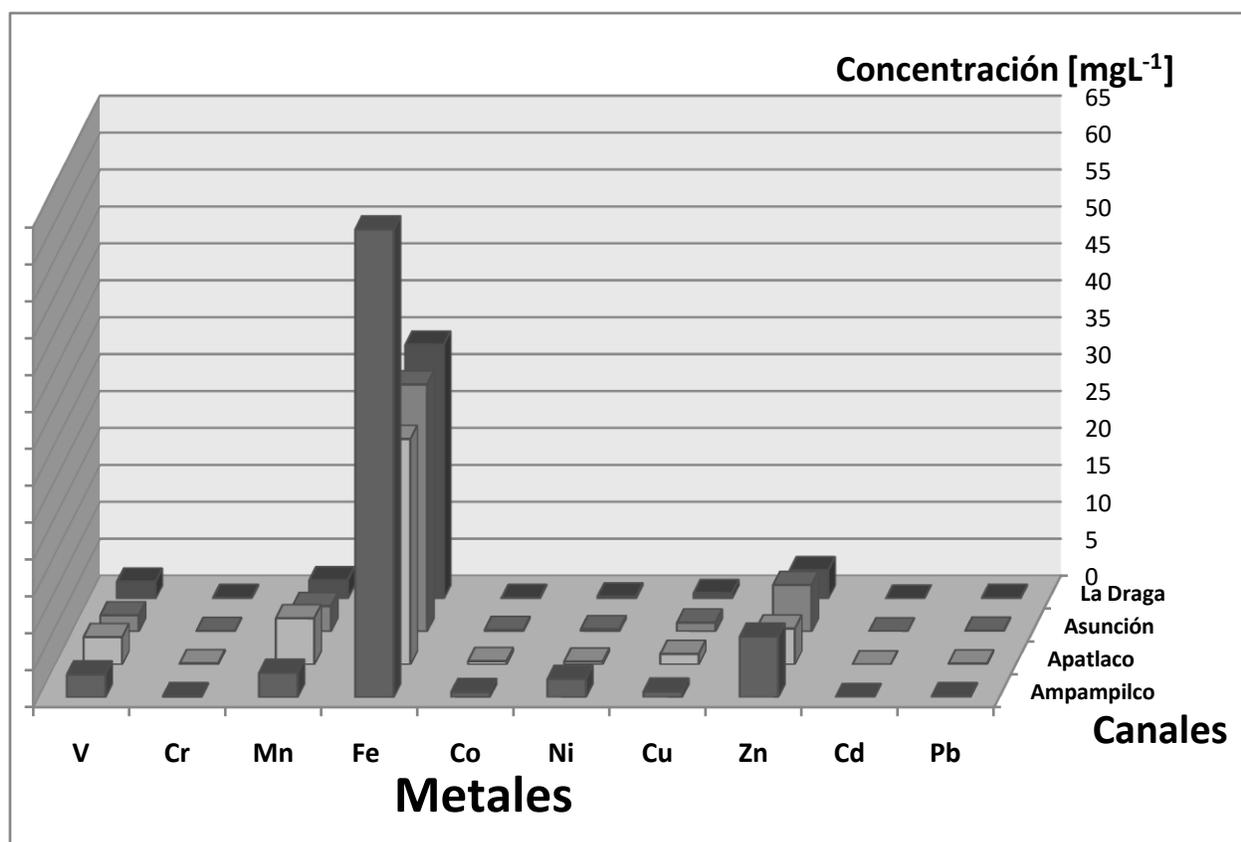


Figura 5.3. Concentración de metales en agua + PS presentes en los diferentes canales de Xochimilco.

Límites Máximos Permisibles para metales pesados y cianuros (mgL⁻¹)		
Metal	Embalses Naturales y Artificiales	
	Uso en Riego Agrícola	
	P.M.	P.D.
Arsénico (As)	0.2	0.4
Cadmio (Cd)	0.2	0.4
Cianuros (CN)	2.0	3.0
Cobre (Cu)	4.0	6.0
Cromo (Cr)	1.0	1.5
Mercurio (Hg)	0.01	0.02
Níquel (Ni)	2.0	4.0
Plomo (Pb)	0.5	1.0
Zinc (Zn)	10.0	20.0

Tabla 5.0. Límites Máximos Permisibles para metales pesados y cianuros (NOM-001-SEMARNAT-1996), PM= Promedio Mensual, PD= Promedio Diario.

Actualmente, en México, la investigación realizada en materia de contaminación por metales pesados y sus potenciales implicaciones hacia el ambiente y la salud no es suficiente; como consecuencia, el desarrollo tecnológico para dar solución a este tipo de problemas es inadecuado.

De las *Figuras 5.5 a la 5.8* se muestra la distribución espacial de las especies químicas metálicas determinados en el agua de los canales de Xochimilco en donde se puede apreciar que la mayor concentración de los iones se encuentran asociados a partículas suspendidas, así como asociados a aniones formando sales inorgánicas (OH^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^-).

En el canal de Ampampilco, *Figura 5.5*, no se observa presencia de iones en forma precipitada salvo para el Fe(III) que se encuentra cerca de un 100% formando $\text{Fe}(\text{OH})_3$ lo que es coherente por las condiciones de pH; la mayoría de los metales se encuentran arriba del 50% en forma asociada a aniones inorgánicos y el resto en forma de ión libre, salvo para V y Cr ya que la mayor parte se encuentra asociado a partículas suspendidas.

Para el canal de Apatlaco, *Figura 5.6*, de igual forma que en Ampampilco no se observa presencia de iones en forma precipitada salvo para el Fe(III) que se encuentra casi en un 100% formando $\text{Fe}(\text{OH})_3$, también la mayoría de los metales se encuentran arriba del 50% en su forma asociada a aniones inorgánicos y el resto en forma de ión libre, igual que el caso anterior también V y Cr son las excepciones encontrándose la gran mayoría asociados a partículas suspendidas.

En el caso del canal de Asunción, *Figura 5.7*, se observa la misma tendencia que en los canales de Ampampilco y Apatlaco, salvo que el Pb y el Cu se encuentran junto con el V y el Cr en una mayor parte asociado a partículas suspendidas arriba del 50%.

Para el caso del canal de la Draga, *Figura 5.8*, se observa la misma tendencia que en el canal de Asunción, el Pb, el Cu, más el Mn que se agrega a la lista junto con el V y Cr se encuentran por encima del 50% (algunos casi llegando al 100%, como el V y el Cr) asociados a partículas suspendidas, de igual forma se observa la misma condición para el Fe(III) que se encuentra formando Fe(OH)₃. Las tablas con los datos usados para la realización de las gráficas se encuentran en el **Anexo V**.

Haciendo una comparación de los datos obtenidos de concentraciones en partículas suspendidas (PS), *Figura 5.4*, se tiene que del programa WHAM las concentraciones experimentales determinadas de la resta de Concentración total de metales en Agua + PS y Concentración de metales en fase coloidal subestima la concentración del hierro (III) y solo en unos sitios como en Ampampilco y Apatlaco el hierro (II) y sobrestima la concentración de metales como el vanadio en todos los sitios, y el manganeso y zinc solo en Asunción y la Draga.

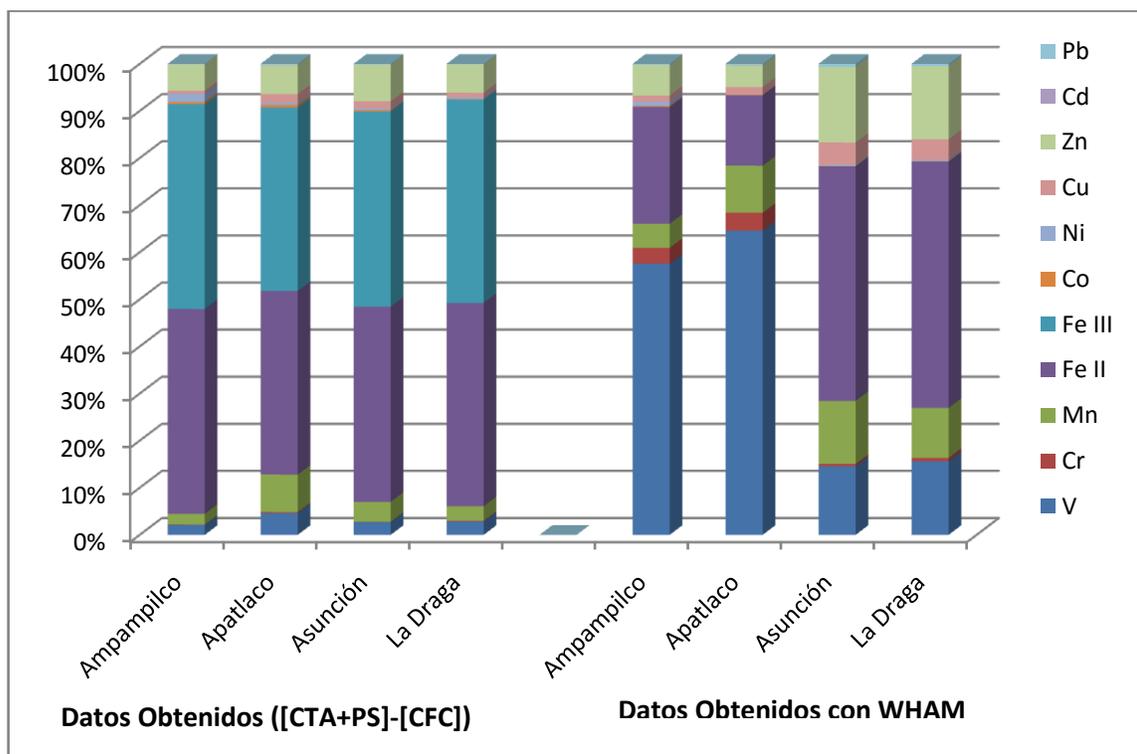


Figura 5.4. Comparación de la concentración de metales presentes en partículas suspendidas (PS), CTA= Concentración Total en Agua, CFC=Concentración en Fase Coloidal.

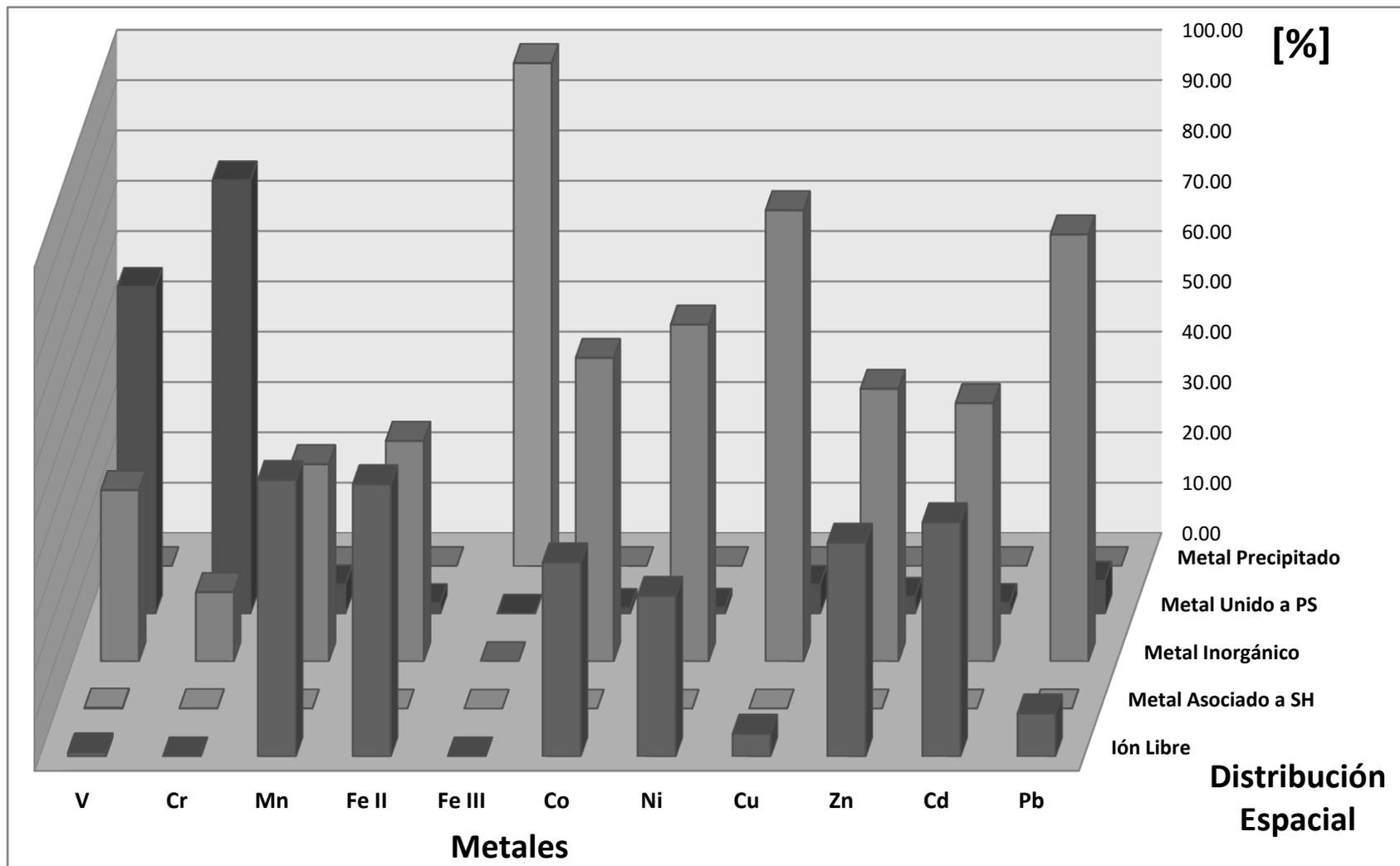


Figura 5.5. Distribución espacial de iones metálicos en el agua del canal de Ampampilco.

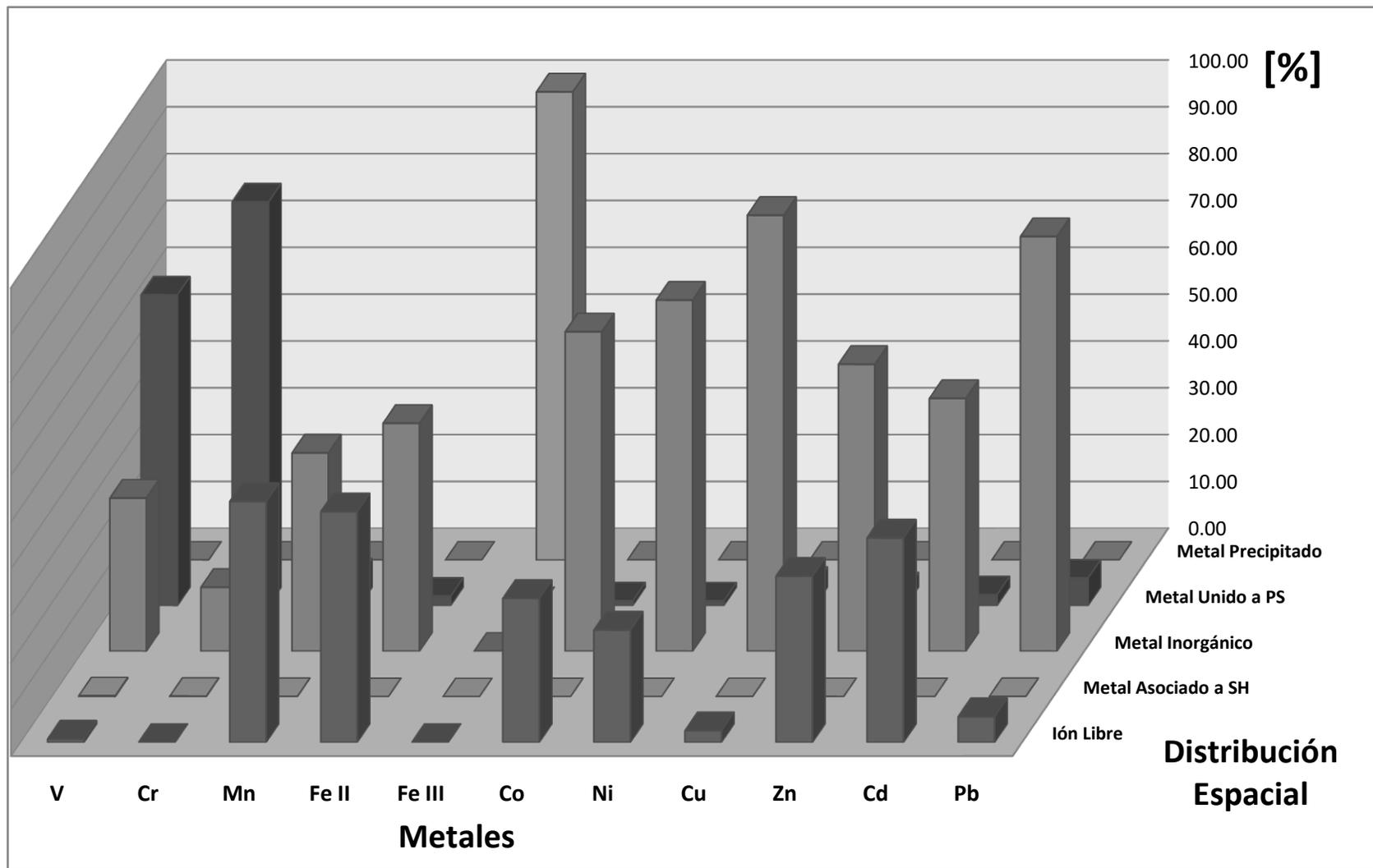


Figura 5.6. Distribución espacial de iones metálicos en el agua del canal de Apatlaco.

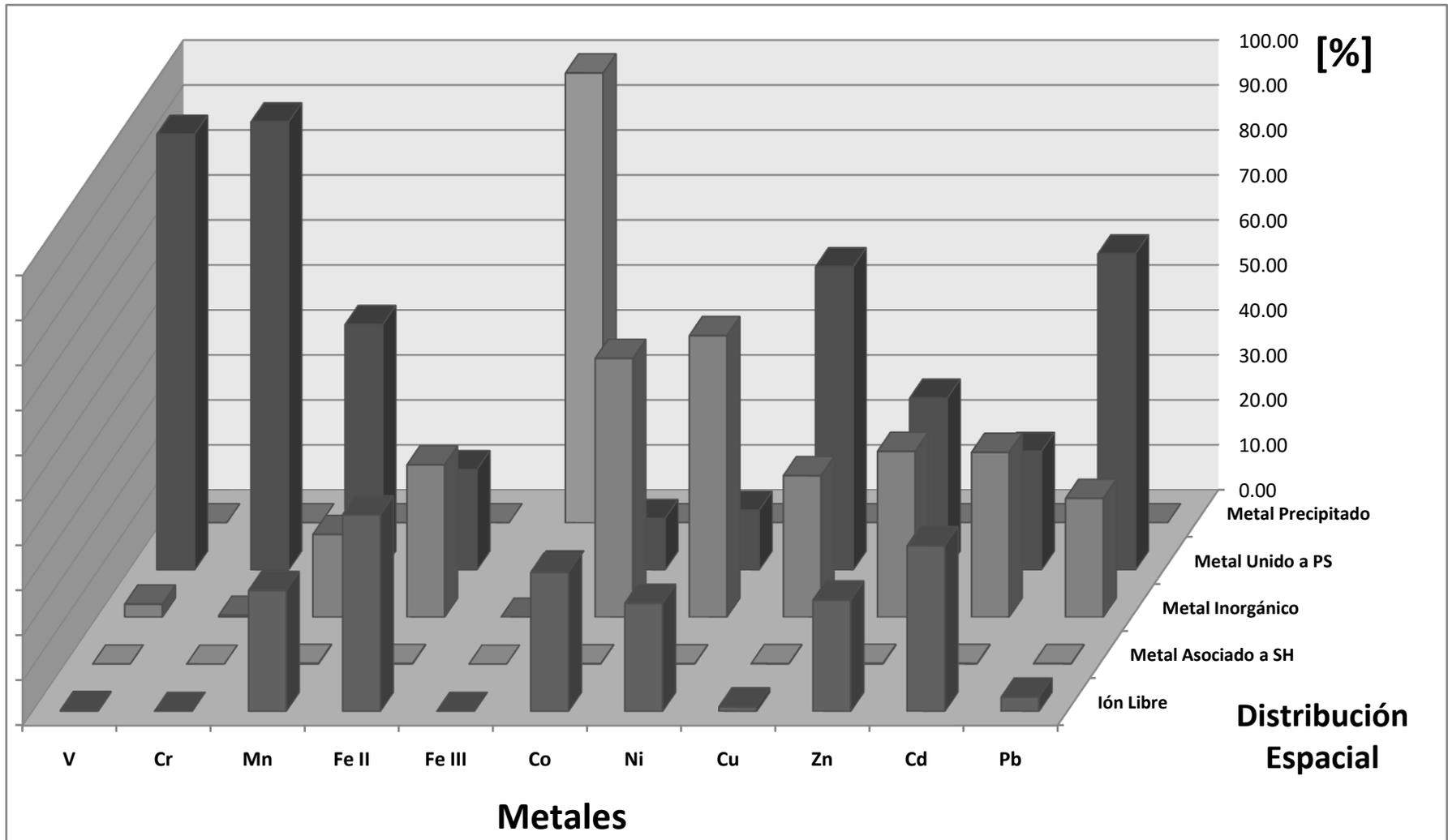


Figura 5.7. Distribución espacial de iones metálicos en el agua del canal de Asunción.

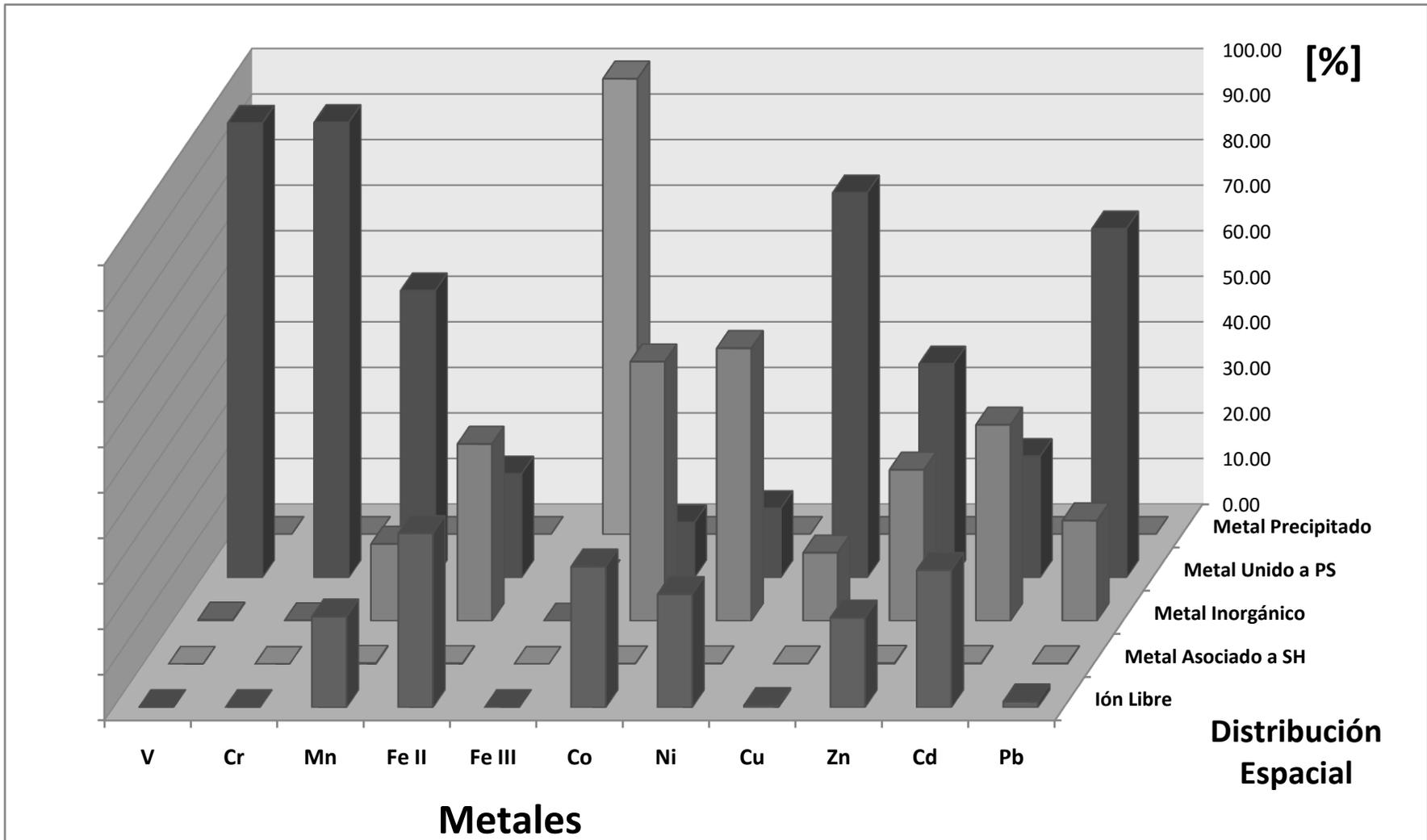


Figura 5.8. Distribución espacial de iones metálicos en el agua del canal de la Draga.

Estudio de los metales biodisponibles (ión libre) en el agua de los canales.

El conocimiento de la especiación de metales traza en aguas naturales es ampliamente reconocida como una clave para comprender tanto su movilidad geoquímica como el impacto en sistemas naturales de agua dulce. En ecotoxicología los metales traza pueden interactuar con una variedad de ligantes, incluyendo aniones inorgánicos comunes (OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , F^- y SO_4^{2-}). Desde el punto de vista geoquímico o ecotoxicológico las especies claves son los iones metálicos libres (biodisponibles), éstos usualmente se encuentran en equilibrio con varios ligantes disueltos o particulados y con el epitelio o células superficiales de los organismos acuáticos nativos (Mueller *et al.*, 2012).

A partir de los datos determinados con base en el programa WHAM se realizaron comparaciones de las concentraciones de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua de los diferentes canales. En las *Figuras 5.9 a 5.11* se muestran las concentraciones respectivamente de los metales de origen antropogénico, geogénico y macronutrientes en donde se observa que el Fe(II) es que se encuentra en mayor concentración por encima de los 10 mgL^{-1} , mientras que en la *Figura 5.12* se observa que la distribución en porcentaje en todos los sitios para el metal libre o ión libre (biodisponible) se encuentra por debajo del 50% a excepción del Fe(II) y Mn en los canales de Ampampilco y solo para Mn en el canal de Apatlaco, lo anterior indica que los metales se encuentran mayoritariamente asociados a partículas de gran tamaño lo que hace que sean menos asequibles para los organismos nativos de la zona.

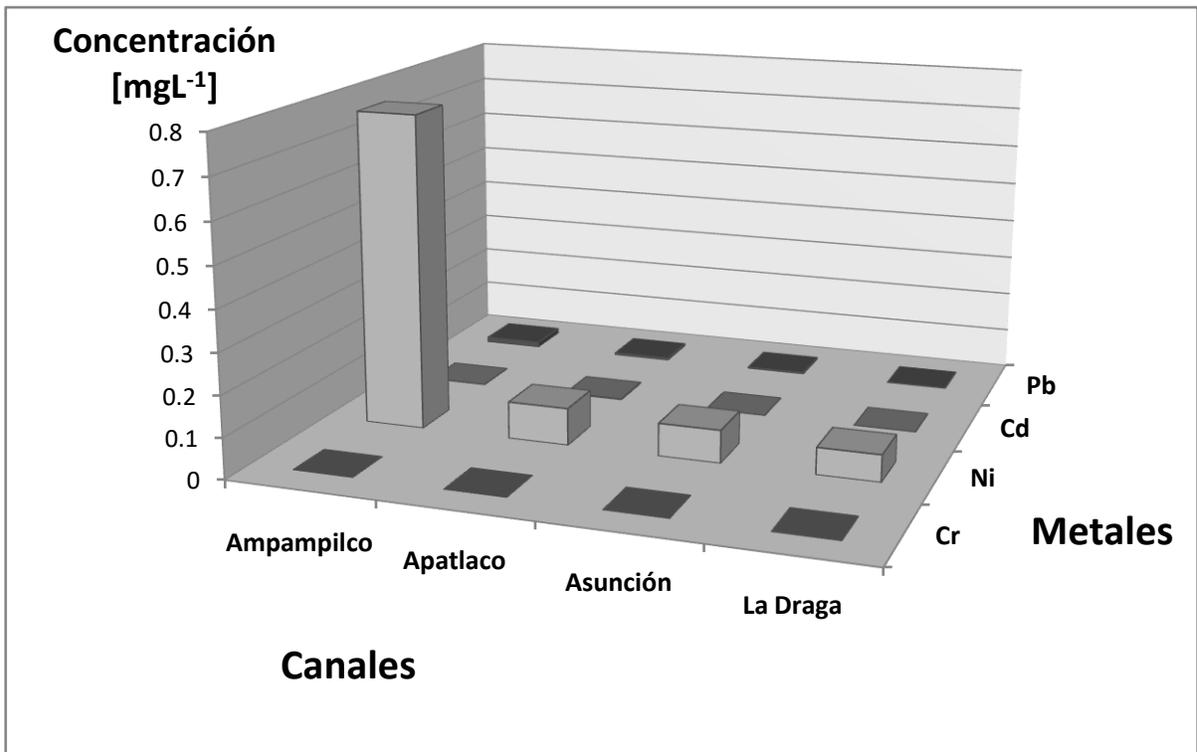


Figura 5.9. Concentración del ión libre (biodisponible) de metales de origen antropogénico presente en los canales muestreados de Xochimilco.

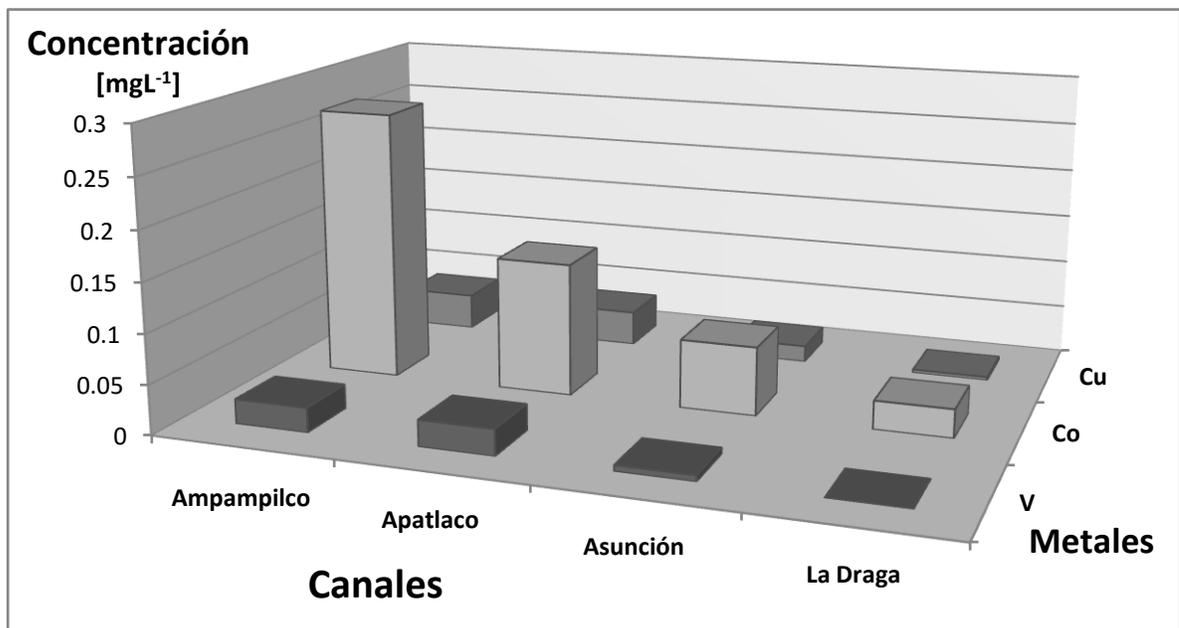


Figura 5.10. Concentración del ión libre (biodisponible) de metales de origen geogénico presente en los canales muestreados de Xochimilco.

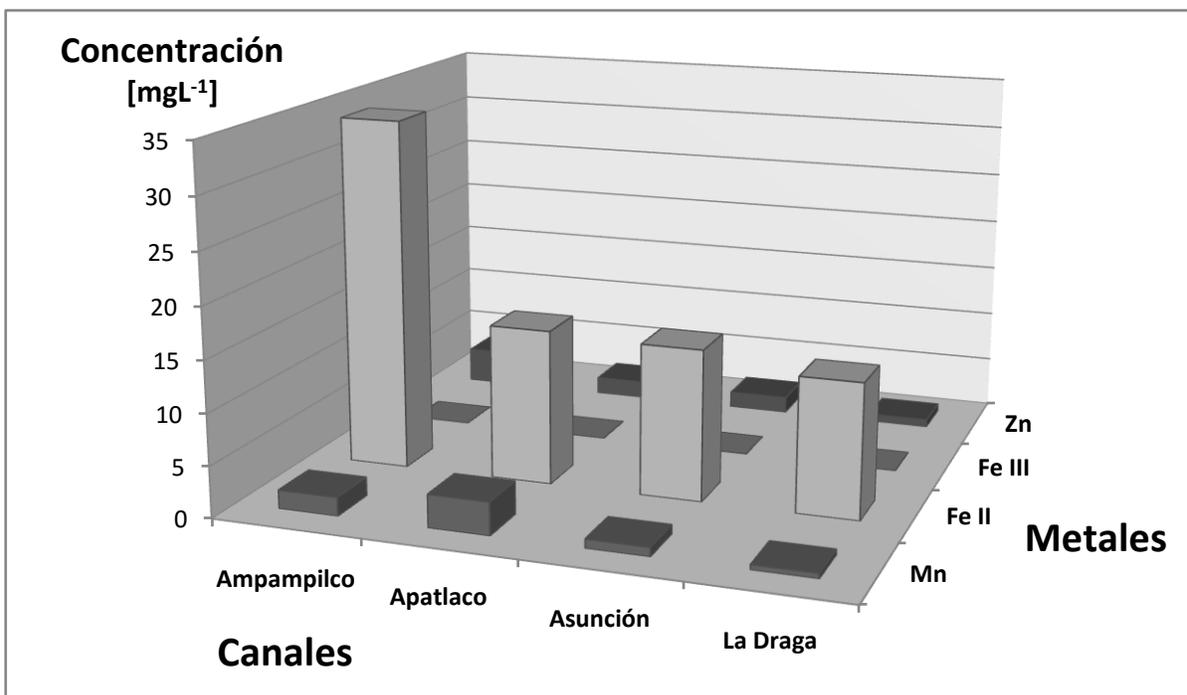


Figura 5.11. Concentración del ión libre (biodisponible) de macronutrientes presente en los canales muestreados de Xochimilco.

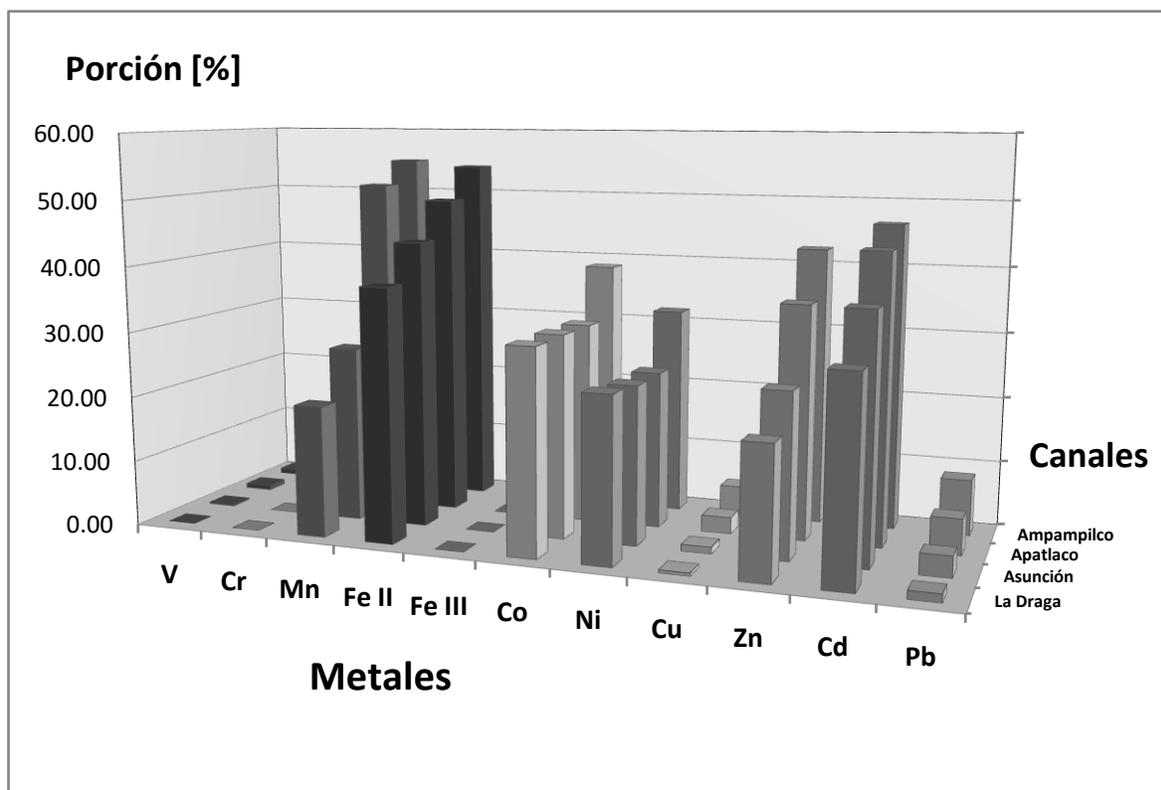


Figura 5.12. Porción del ión libre (biodisponible) presente en los diferentes canales de Xochimilco.

La *Figura 5.13* muestra la relación de partículas suspendidas y la cantidad de materia orgánica relacionada a ella, esta gráfica indica que el canal de la Draga presenta la mayor concentración de partículas suspendidas, pero la cantidad de materia orgánica que presenta no alcanza el 20%.

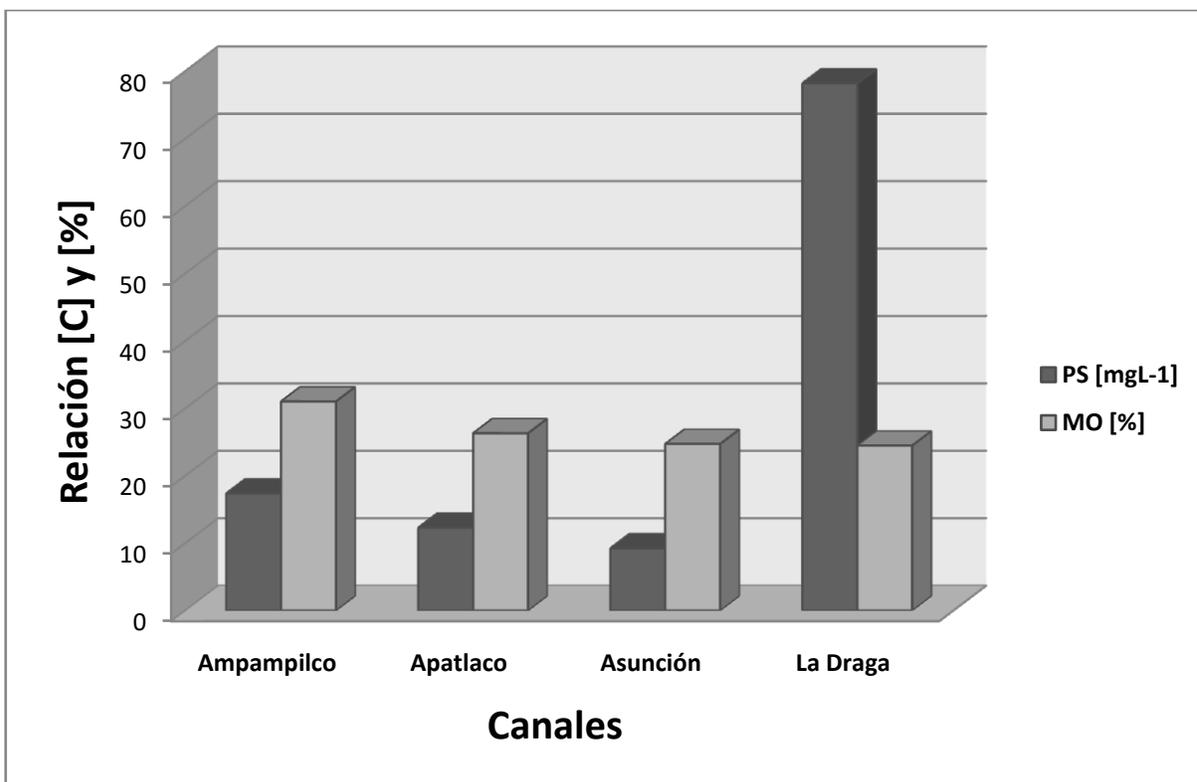


Figura 5.13. Relación de la concentración de partículas suspendidas (PS) y su porcentaje de materia orgánica (MO).

El analizar las concentraciones de metales en agua con PS y la concentración de metales en PS estimado por WHAM los valores se subestiman en el modelo, esto se puede explicar porque el WHAM al parecer no considera la materia orgánica (MO) de las PS y lo considera como arcillas. Pero no se puede determinar si la MO tiene gran aromaticidad (**Anexo VI**).

Efecto Tóxico de los metales biodisponibles (Toxicidad).

En la zona de Xochimilco, no existen estudios que aborden la biodisponibilidad de los metales en el agua, ni estudios que definan las rutas de incorporación a los organismos acuáticos. Los estudios que existen, *Tabla 5.2*, sobre la incorporación de metales por los organismos acuáticos de la zona se enfocan solo en cuantificarlos, sin precisiones sobre la toxicidad, ni su relación con su concentración en agua, partículas suspendidas o sedimentos, áreas que deben ser estudiadas (Ponce de León *et al.*, 2016).

Organismo	Metales esenciales (con función biológica conocida)						Metales sin función biológica conocida			Referencia
	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Zn	Cd	Ni	Pb	
<i>Ambystoma mexicanum</i> ^H (Ajolote)	0.1- 1.2	0.1- 3.9	13.9- 65.8	1.8- 172.3	2.3- 13.2	51.5- 105.6	0.05- 2.72	0.15- 2.09	0.05- 2.62	Gonzalez, 2006
<i>Cambarellus Montezumae</i> (Acocil)	--	17.83	--	51.53	--	--	2.03	17.97	1.07	Gayosso, 2009; Hernández de la Rosa, en proceso
<i>Menidia Jordani</i> (Charal)	7.01	8.79	6.33	75.7	11.2	117.8	1.26	23.5	12.6	González, 1997
<i>Oreochromis niloticus</i> ^H Tilapia	2.72	0.26	126.4	806	7.21	116.6	0.08	4.09	0.45	Molina, en proceso; Valenzuela Velazquez, 2016
<i>Carassius auratus</i> ^H Carpa dorada	6.46	3.51	18.2	280.5	4.89	144.6	1.02	5.83	23.7	Moreno, 1997
<i>Ciprynus carpio</i> ^H Carpa común	--	17.8	--	399.2	--	--	5.4	29.1	2.8	Gayosso, 2009

Tabla 5.1. Concentración promedio de metales (mgL^{-1}) en diferentes organismos acuáticos en la zona de Xochimilco, ^H metales analizados en hígado.

Haciendo una comparación de los datos determinados para ión libre (biodisponible), éstos se encuentran por debajo de lo reportado en organismos acuáticos nativos de la zona. Cabe resaltar que los datos reportados son la muestra de la bioacumulación que presentan los organismos ante la presencia de los metales que se encuentran en el agua.

Capítulo 6. Conclusiones.

- La determinación de la concentración total de metales nos proporciona una muestra del nivel de contaminación en el agua de los canales.
- De acuerdo a los resultados obtenidos no podemos evidenciar que un sitio es el más contaminado de todos, pero el canal de Ampampilco es el que presenta una mayor cantidad de metales, que es posible que se deba a la influencia de los suelos enriquecidos de las chinampas que son utilizadas con fines agrícolas para la producción.
- Los metales determinados y analizados no se presentan en altas concentraciones solamente el hierro es metal que se encuentra en mayor cantidad en el agua de los canales.
- Respecto a si cumplen o no con la NOM-001-SEMARNAT-1996, se debe decir que si lo hacen, aunque la norma no establece límites para todos los metales analizados en el trabajo, aunque se debe decir que el níquel se encuentra por arriba de los límites permisibles en el agua del canal de Ampampilco.
- Al realizar la comparación entre los modelos matemáticos se observa que no hay gran diferencia entre ellos, los tres dan gran información, aunque la ventaja que tiene el WHAM sobre los otros dos es que es más útil en sistemas en los que la materia orgánica se encuentra en cantidades abundantes como lo es el agua de los canales de Xochimilco.
- La determinación de la concentración de metales libres en la columna de agua nos da información sobre la biodisponibilidad de los mismos en la zona, lo que nos permite hacer una comparación con los datos reportados sobre el efecto que presentan los organismos acuáticos nativos.
- Se determinó la influencia que tiene la materia orgánica en la biodisponibilidad de los iones metálicos, aunque los resultados mostraron que en la fase coloidal solo una pequeña parte se encuentra asociada a las sustancias húmicas, aunque gran parte de la concentración de los iones metálicos se encuentra asociada al material particulado que se encuentra en suspensión en el agua de los canales.

- Al realizar la comparación de la concentración de metales en partículas suspendidas se observa que se subestima el hierro (III) y se sobrestima el vanadio en todos los sitios así como el zinc y el manganeso solo en unos sitios. Esto demuestra que el programa es efectivo para la estimación de metales en el material particulado, pero no indica la forma en la que se encuentran los iones asociados a este.
- El área de trabajo recibe dos tipos de agua de desecho: la de tipo doméstico y la de tipo industrial. En el segundo tipo los principales aportadores son la industria azucarera, química, papel celulosa, petróleo, bebidas, textil, siderúrgica, eléctrica y alimentos y el total del agua que desechan sólo el 25% es tratada en 361 plantas tratadoras, pero resulta solo un tratamiento secundario lo que lleva a que este tipo de agua sólo puede ser utilizada para riego de parques y jardines, debido a que se encontró que inclusive después de todo el tratamiento presenta gran número de organismo patógenos, se tendría que definir el uso que se le daría al agua dependiendo del tipo de contaminantes existentes para determinar si se usan para el abastecimiento humano, actividades agrícolas y para la industria.

Capítulo 7. Bibliografía.

- Acevedo, O., Cruz, E., Cruz, M., Ortiz, E. 2004. *El Papel de Óxidos de Hierro en Suelos*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., Terra Latinoamericana, 22(4): 485-497.
- Alleyne, S., De la Fe, C., Cortés, I. 2004. *Sequential determination of metals in soils using atomic absorption spectrometry and nonconventional nebulization*. Laboratory techniques. 26: 12-15.
- Alloway, B. J. 1990. *Heavy metals in soils*. Blackie. Academic & Professional. Glasgow.
- Arqueología Mexicana. *Lagos del Valle de México*, Num. 6, Julio-Agosto, 2004. <http://www.arqueomex.com/S2N3nDOSIER86.html>
- ASTDR-US, (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs5.html
- Baken, S. et al. 2011. *Metal Complexation Properties of Freshwater Dissolved Organic Matter Are Explained by Its Aromaticity and by Anthropogenic Ligands*. Division of Soil and Water Management, Haverlee, Belgium. *Environ. Sci. Technol.* 45: 2584-2590.
- Balanzario, Z. J. R. 1976. *Contaminación de las Aguas en los Canales de Xochimilco*, Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, D.F.
- Ballinas, V. 1990. *Los Campesinos Capitalinos*, La Jornada, 20 de Septiembre, IV-VII. México.
- Bautista-Zúñiga, F., Cram-Heydrich, S., Sommer-Cervantes, I. 2004. *Capítulo 2: Suelos, Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*, México, UNAM/Universidad Autónoma de Yucatán/Conacyt/Instituto Nacional de Ecología, 73-97. ISBN 970-32-1778-8
- Bleackley, M. R. y R.T.A., M. 2011. Transition metal homeostasis: from yeast to human disease. *Biometals*, 24: 785-809.
- Bojorquez, M., Villa, E. 1995. En: *Presente, pasado y futuro de las chinampas*. México, CIESAS: 85-126.

- Börjesson, G., Menichetti, L., Kirchmann, H., Kätterer, T. 2012. *Soil microbial community structure affected by 53 years of nitrogen fertilisation and different organic amendments*, Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences, P.O. Box 7014, SE-75007 Uppsala, Sweden.
- Boyd, R. S. 2010. *Heavy metal pollutants and chemical ecology: exploring new frontiers*. Journal of Chemical Ecology, 36: 45-58.
- Bradl, H. B. 2005. *Heavy metals in the environment: origin, interaction and remediation*. Interface Science & Technology. Elsevier Academic Press. 6: 1-143.
- Bravo-Álvarez, H., Torres-Jardón, R. 1996. *Características fisicoquímicas y fuentes de contaminantes atmosféricos*. En: A.V. Botello, J.L. Rojas-Glaviz, J.A. Benítez y D. Zárate-Lomelí (Eds.) *Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias*, 203-210. EPOMEX Serie Científica 5. Universidad Autónoma de Campeche, México, 666.
- Brown J., M., 2011. <http://www.jamesmbrown.co.uk/cadmium%20green.htm>
- Campbell, P., Tesiiser, A. 1996. *Ecotoxicology of metals in the aquatic environment: geochemical aspects*. In: Newman, M., Jagoe, C. (eds.) *Ecotoxicology. A Hierarchical Treatment*. NY, USA: CRC Lewis Publisher.
- Canabal, B. et al. 1989. *Viabilidad de las Actividades Agropecuarias como Generadores de Empleo e Ingresos en Xochimilco, D.F.* MS. Revista Argumentos Abril, UAM Xochimilco, México.
- Chanlett, E. T. 1976. *La Protección del Medio Ambiente*, Inst. De Estudios de Adm. Local, Madrid, España, 599, ISBN 84-7088-066-7.
- CNR COP, España. <http://www.cnrcop.es/gc/informate/que-son-los-cop/>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2010. *Estadísticas del Agua en México*. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EAM2010.pdf>
- Contreras Ruiz-Esparza, A. V. 2012. *Variables bióticas y abióticas como indicadores de heterogeneidad en el Lago de Xochimilco*, D.F. Maestría en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- EINECS (European Inventory of Existing Chemical Substances), PRTR España 2007. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. <http://www.prtr-es.es/NOx-oxidos-de-nitrogeno,15595,11,2007.html>

EPA SW-3015^a

<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3015a.pdf>

EPA SW-3052.

<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3052.pdf>

Faud, A.; Gidi, D. 1991. *Control de la Contaminación del Agua en México*. Información Científica y Tecnológica, 13: 173. CONACYT.

Fergusson, J. E. 1990. *The heavy elements: Chemistry, environmental impact and health effects*, New York. Pergamon Press. 143-313.

Figaruelo, J. 2001. *Química física del medio ambiente*, Ed. Reverte. 286-306.

Froehner, S., Maceno, M., et al. 2010. *Sediments as a potential tool for assessment of sewage pollution in Barigüi River, Brazil*. Environmental Monitoring and Assessment, 170: 261-272.

Gamma, E. 2014. *¡La Cuenca, que no valle, de México!* Cavilaciones y Desvaríos. 19 de Enero.

<http://www.cavilacionesydesvarios.com/?p=1190>

Gayosso, F. 2009. *Evaluación de metales pesados en acocil y carpa del lago de Xochimilco*. Licenciatura en Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.

González, E. E. 1997. *Presencia de metales pesados en Cambarellus montezumae, Ambystoma mexicanum y Chirostoma jordani, especie endémicas comestibles del área lacustre de Xochimilco*. Informe de Servicio Social en Biología, UAM Xochimilco.

González-Rendón, S. 2006. *Evaluación in situ del efecto biológico de metales pesados en el ajolote Ambystoma mexicanum*. Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.

González, S. 2006. *Evaluación del efecto de la contaminación por metales pesados en el ajolote Ambystoma mexicanum en los canales de Xochimilco*. Tesis de Licenciatura en Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Hernández, M. 2009. *Gestión y conservación del suelo*. Departamento de Biotecnología. Universidad Nacional Autónoma de México.

Hernández de la Rosa, C. E. (en proceso). *Estrés oxidante como respuesta a la exposición in situ de metales en acocil (Cambarellus montezumae, Saussure 1857) de la zona lacustre de Xochimilco*. Tesis de Licenciatura en Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Holleman, Arnold F.; Wiberg, Egon; Wiberg, Nils. 1985. *Vanadium. Lehrbuch der Anorganischen Chemie* (91–100 edición). Walter de Gruyter. 1071–1075. ISBN 3110075113.

INE (Instituto Nacional de Ecología), 2012. Dirección de Investigación sobre Sustancias Químicas y Riesgos Ecotoxicológicos. Consulta en línea

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), 2013. SEMARNAT, México. Consulta en línea.

Izcapa, T. C., Arcos, S., M. E., et al. 2006., *Identificación y evaluación de sitios contaminados* en Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Químicos. CENAPRED. ISBN: 970-628-903-8. México D.F.

Jauregui, E. 1987. *Climas, Atlas de la Ciudad de México*, COLMEX, Plaza y Valdés Editores (PVE) México.

Lenntech BV: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm>

Lenntech BV: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm>

Lenntech BV: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm>

Lenntech BV: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/fe.htm>

Lenntech BV: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/mn.htm>

Lenntech BV: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ni.htm>

Lenntech BV: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/pb.htm>

Lenntech BV: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/v.htm>

Lenntech BV: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/zn.htm>

Manahan, S. E. 2007. *Introducción a la Química Ambiental*. Reverté Ediciones, S.A. de C.V. y Universidad Nacional Autónoma de México. España 1^a Edición.

Manual of Instruction for Sewage Treatment Plant Operators. 2008. New York State, Department of Health, Albany, N. Y., 303.

Marín, J. y Hernández, M., INECOL.

<http://www.inecol.edu.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/172-los-humedales-sus-funciones-y-su-papel-en-el-almacenamiento-del-carbono>

- Martin, M. V. 2011. *Caracterización y fotoquímica de sustancias húmicas de diferentes orígenes*. Tesis de Doctorado en Ciencias Exactas, Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Química, Universidad Nacional de La Plata.
- Martínez, M., INECOL. <http://www.inecol.edu.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/417-manglares-humedales-costeros-que-no-hay-que-olvidar>
- Merck Millipore Corporation. © 2015 EMD Millipore, Billerica, MA. http://www.merckmillipore.com/MX/es/product/Sistemas-de-filtraci%C3%B3n-de-laboratorio,MM_NF-C10732
- Molina, F. A. 1970. *Vocabulario en Lengua Castellana y Mexicana y Mexicana y Castellana*. México, D.F. Editorial Porrúa, S. A.
- Molina, M. (en proceso). *Acumulación de metales en Tilapia nilotica de la zona lacustre de Xochimilco*. Tesis de Licenciatura en Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mooser, F. 1987. *Geología. Atlas de la Ciudad de México*, COLMEX, D.D.F. y PVE, México.
- Moreno, Y. 1997. *Concentración de metales pesados en tres especies de carpa (Carassius auratus, Cyprinus carpio variedad rubrofuscus y Ctenopharingodon idella) de la zona lacustre de Xochimilco*. Informe de Servicio Social, Universidad Autónoma de México, Xochimilco.
- Mueller, K. K. et al. 2012. *Trace metals speciation predictions in natural aquatic systems: incorporation of dissolved organic matter (DOM) spectroscopic quality*. INRS Eau Terre et Environnement, Québec, Canadá. *Environ. Chem.*, 9: 356-368.
- NIST <http://ts.nist.gov/srm>
- NOM-001-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana. *Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*.
- Paquin, P. R. et al. 2003. *Metals in Aquatic Systems: A Review of Exposure, Bioaccumulation, and Toxicity Models (Metals and the Environmenta Series)*. Paperback. SETAC Foundation, November.

- Parsons, J. 1982. *Prehispanic Settlement Patterns in Southern Valley of Mexico. The Chalco-Xochimilco Region*. Memoir of the Museum of Anthropology, 14 u of Michigan, USA.
- Ponce de León, C. et al. 2016. *Modelos Conceptuales para el análisis del Impacto de Contaminantes: Sistema Lacustre-Urbano Xochimilco como estudio de caso*.
- Reuther, R. 1999. *Trace metal speciation in aquatic sediments: methods, benefits and limitations*. In: *Manual of Bioassessment of Aquatic Sediment Quality (chapter 1)*; Lewis Publishers, Boca Raton, FL., 1-54.
- Rosas, I., A. Baez, et al. 1984. *Bacteriological quality of crops irrigated with wastewater in the Xochimilco plots, Mexico-city, Mexico*. Applied and Environmental Microbiology 47(5): 1074-1079.
- Stobrawa, K., Lorenc-Plucinska, G. 2007. *Changes in antioxidant enzyme activity in the fine roots of black poplar (Populus nigra L.) and cottonwood (Populus deltoids Vrat. ex Marsch) in a heavy-metal-polluted environment*. Plant and Soil, 298: 57–68.
- Strauch, G., M. Möder, et al. 2008. *Indicators for assessing anthropogenic impact on urban surface and groundwater*. Journal of Soils and Sediments 8(1): 23-33.
- Sutton, R.; Sposito, G. 2005. *Molecular Structure in Soil Humic Substances: The New View*. Environ. Sci. Technol. 39: 9009-9015.
- Tejada, G. C. 2001. *Perspectivas del Aprovechamiento de las Aguas Residuales en la Agricultura*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 87-93.
- Torres-Morales, J. C. 1992. *Evaluación de Impacto de los Metales Pesados del Agua Residual Provenientes de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (CIVAC) en el Recurso Suelo y en Cultivos en los Municipios Jiutepec, Emiliano Zapata y Xuchitepec, Estado de Morelos*. Ing. Agrícola, FESC. UNAM. 132.
- Valenzuela-Velazquez, Y. 2016. *Estudio in situ del estrés oxidante en la tilapia Oreochromis niloticus de la zona lacustre urbano-agrícola de Xochimilco*. Tesis de Licenciatura en Biología, UNAM.

- Van Zomeren, A., Comans, R. 2007. *Measurement of Humic and Fulvic Acid Concentrations and Dissolution Properties by a Rapid Batch Procedure*. Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) and Department of Soil Quality, Wageningen University, 41(19): 6755-6761.
- Vidrio-Carrasco y Ávila-Jiménez. 2000. *En: La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. GDF-El Colegio de México, 637-643.
- Von der Heyden, C. J., New, M. G. 2004. *Sediment chemistry: a history of mine contaminant remediation and an assessment of processes and pollution potential*. Journal of Geochemical Exploration, 82: 35-57.
- Water Resources Engineering , http://www.hydroqual.com/wr_blm.html
- Weishaar, J., et al. 2003. *Evaluation of Specific Ultraviolet Absorbance as an Indicator of the Chemical Composition and Reactivity of Dissolved Organic Carbon*. U.S. Geological Survey, Boulder Colorado, USA. Environ. Sci. Technol., 37: 4702-4708.
- Wright, J., 2003. *Environmental Chemistry (Routledge Introductions to Environment: Environmental Science)*. Programme for Geography and Applied Environmental Science in School of Management, Community and Communication at College of Ripon and York, St. John, University of Leeds, UK.
- Zsolnay, A. 2003. *Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions*. Geoderma, 113: 187–209.

7.1. Bibliografía Complementaria.

<http://www.atlasmacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-sanitario-ecologicos/contaminacion-de-aire-del-agua-suelos-y-alimentos>

<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM09DF/delegaciones/09013a.html>

<http://www.inecc.gob.mx/sqre-temas/768-sqre-plaguicidas#arriba>

<http://lagosylagunasmex.blogspot.mx/p/lagos-y-lagunas-de-mexico.html>

Capítulo 8. ANEXOS

8.1. Anexo I

Localización de los sitios de muestreo en un mapa de la zona.

En la siguiente *Figura 1.0* se muestran los puntos muestreados en el trabajo.



Figura 8.0. Mapa de los sitios muestreados en la zona de Xochimilco.

8.2. Anexo II

Procesamiento de muestras.

- a) En caso necesario, eliminar con alcohol etílico o quita esmaltes los datos escritos en el material que se va a lavar.
- b) Enjuagar el material con agua de la llave.
- c) Lavar con jabón de laboratorio, nunca usar detergentes o jabones para uso doméstico. En casos especiales como la cuantificación de fósforo el material se debe lavar con jabón Extrán exento de fosfatos.
- d) Enjuagar el material con agua corriente varias veces (hasta que ya no se vea espuma).
- e) Enjuagar con agua destilada. Dejar el material en el escurridor o secarlo en la estufa a 60°C por una hora.
- f) Dejar enfriar y continuar la limpieza de acuerdo con el propósito de uso.

Material para determinar compuestos inorgánicos: metales, aniones y/o cationes.

- El material proveniente del paso e) ya seco se coloca en un contenedor con HNO₃ al 10% durante 2 horas (usando guantes de nitrilo). Si lo que se va a determinar son nitritos, nitratos y amonio es mejor enjuagar el material con HCl al 10% para evitar interferencias.
- Sacar el material del agua acidulada y enjuagar con agua destilada hasta quitar bien el ácido (al ponerlo en contacto con una franela de color rojo ésta no cambie de color).
- Dejar secar el material en el escurridor o en la estufa a 60°C, y dejar enfriar.
- Cuando el contenido del baño acidulado se ponga amarillo o tenga partículas en suspensión, hay que preparar nuevamente el agua acidulada. El agua acidulada reemplazada se deposita en contenedores de 40 litros para su posterior desecho.

Material para determinar compuestos orgánicos: plaguicidas, hidrocarburos, etcétera.

- El material de vidrio proveniente del paso e) ya seco, usando guantes de nitrilo se coloca en un contenedor con HCl al 10% durante 2 horas.
- Sacar el material y enjuagar con agua destilada hasta quitar bien el ácido (al ponerlo en contacto con una franela de color rojo ésta no cambie de color).
- Dejar secar el material en el escurridor o en la estufa a 60°C, y dejar enfriar.
- En la determinación de carbón orgánico total, la limpieza del material se realiza hasta este punto, debido a que enjuagar con acetona y/o hexano puede dejar rastros de carbón en el material y causar contaminación.
- Usando guantes se enjuagan las paredes internas de los recipientes con acetona, se deja que la acetona evapore completamente a temperatura ambiente.
- Se coloca el material en el horno a 200°C por 2 horas y se deja enfriar.
- No meter el material volumétrico al horno porque puede descalibrarse.
- Enjuagar las paredes internas del recipiente con hexano; dejar que el hexano evapore a temperatura ambiente.
- El material ya limpio y seco se guarda cubierto con papel aluminio.

Este es el procedimiento mínimo de limpieza del material en general, entendiéndose que no se deberá dejar el material abandonado a medio proceso.

8.3. Anexo III

Limpieza de la resina DAX-8.

- La resina (100 g) se coloca en vaso de precipitado y se le agregan 200 mL de una solución de HCl al 0.1 M. Se agita suavemente a lo largo del día y se decantan las partículas finas que se suspenden en la solución. Este procedimiento se repite durante 5 días y se realiza de igual forma con la solución de NaOH al 0.1 M (10 días en total). El COD en la solución de enjuague, baja progresivamente de aproximadamente 1000 a 10 mgL⁻¹.
- A continuación la resina se limpia en un sistema de extracción Soxhlet con acetonitrilo y metanol por 24 horas respectivamente (teniendo especial cuidado en el manejo de la resina durante la colocación del cartucho en el equipo). Una vez terminado este procedimiento, la resina se almacena en Metanol y antes de usarse se filtra en papel Whatman de 41 en embudo Buchner y se lava repetidamente con agua desionizada y HCl al 0.1 M (alrededor de 1 L por cada uno).
- Una vez terminada la limpieza de la resina, se verifica que la resina tenga un sangrado de carbón orgánico no mayor a 3 mgL⁻¹. Para ello se toman 10 gramos de la resina y se le agregan 50 mL de HCl al 0.1 M y se agita por una hora permitiendo sedimentar por 5 min, para después determinar el contenido de carbono orgánico en TOC. Si el contenido de carbono orgánico es mayor a 3 mgL⁻¹, se deberá repetir el procedimiento de limpieza.

Determinación del % de Humedad en la Resina DAX-8.

Se tomó el peso de 5 charolas (pesa muestras) y se marcaron del 1 al 5.

En 5 charolas marcadas se agregó una muestra de aproximadamente 2 g de Resina DAX-8 húmeda y se anotaron los pesos de las charolas con el peso de la resina húmeda.

Las charolas se colocaron en la estufa a 50°C por 1 hora.

Posteriormente se sacaron de la estufa, se esperó unos minutos para que las charolas adquirieran la temperatura ambiente y después se pesaron, se anotaron los pesos de las charolas con el peso de la resina seca.

Se realizaron los cálculos para determinar el % de humedad con base en los resultados obtenidos de los pesos según la siguiente fórmula:

$$\%H = \frac{\text{Peso resina húmeda} - \text{Peso resina seca}}{\text{Peso resina húmeda}} \times 100$$

Masa [g]							
Charola	P _{charola}	P _{charola + RH}	P _{charola + RS}	RH	RS	Humedad [%]	Prom [%]
1	0.5483	2.0723	1.3706	1.524	0.8223	46.04330709	45.9607216
2	0.5478	2.055	1.3591	1.5072	0.8113	46.17170913	
3	0.5488	2.0566	1.3492	1.5078	0.8004	46.91603661	
4	0.5472	2.0138	1.3487	1.4666	0.8015	45.34978863	
5	0.5537	2.03	1.3609	1.4763	0.8072	45.32276638	

Tabla 8.0. Porcentaje de Humedad determinado de la resina DAX-8.

8.4. Anexo IV

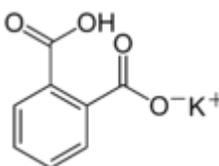
Elaboración de una curva de calibración para la determinación de Carbono Orgánico Total utilizando un patrón primario de Ftalato Ácido de Potasio (Biftalato de Potasio, BFK, $C_8H_5KO_4$).

Para iniciar la elaboración de la curva de calibración se toma en cuenta lo siguiente:

1.0 g/L es lo mismo que 1000 ppm (mg/L)

Se parte con la idea de preparar una disolución madre de Ftalato ácido de potasio (Biftalato de Potasio, BFK) de una concentración de 1000 ppm de Carbono (%C) en un volumen de 100 mL.

Se tiene que en una molécula de Ftalato ácido de potasio hay:



- 8 átomos de Carbono
- 4 átomos de Oxígeno
- 5 átomos de Hidrógeno
- 1 átomo de Potasio

Para conocer la Masa Molecular del Ftalato ácido de potasio es necesario realizar la suma de los Pesos Atómicos de cada uno de los átomos que lo componen utilizando los valores de una tabla periódica, prestando atención en la cantidad de Carbono presente en la molécula:

8 átomos de Carbono	1 átomo de C = 12.01 g/mol	8 x 12.01 = 96.08 g/mol
4 átomos de Oxígeno	1 átomo de O = 15.99 g/mol	4 x 15.99 = 63.96 g/mol
5 átomos de Hidrógeno	1 átomo de H = 1.00 g/mol	5 x 1.00 = 5.00 g/mol
1 átomo de Potasio	1 átomo de K = 39.09 g/mol	1 x 39.09 = 39.09 g/mol

Ftalato ácido de potasio (BKF) = 204.13 g/mol

Para conocer la cantidad de Ftalato ácido de potasio que se requiere pesar para preparar la disolución de 1000 ppm de Carbono se toman en cuenta las Masas Moleculares y Pesos Atómicos.

Una molécula de Ftalato ácido de potasio (BFK) tiene una masa de **204.13 g** de donde **96.08 g** son de Carbono y para preparar la disolución se requiere de **1.0 g** de Carbono por cada Litro, entonces se hace una relación:

$$(1.0 \text{ gC}) \left(\frac{204.13 \text{ g BFK}}{96.08 \text{ gC}} \right) = 2.12 \text{ g}_{\text{BFK}}$$

Se requiere pesar **2.12 g** de Ftalato ácido de potasio (BFK) para preparar 1.0 Litro de disolución, pero se necesitan solo 100 mL, entonces se hace otra relación:

1000 mL = 1.0 L
100 mL = 0.100 L

$$(0.1 \text{ L}) \left(\frac{2.12 \text{ g BFK}}{1.0 \text{ L}} \right) = 0.212 \text{ g}_{\text{BFK}}$$

Para preparar la disolución madre de 1000 ppm de Carbono a partir de Ftalato ácido de potasio se requiere pesar **0.212 g** de dicha sal y llevarla a un volumen de 100 mL con agua desionizada.

Para preparar los diferentes puntos de la curva de calibración se parte de la disolución madre ya preparada de 1000 ppm de Carbono y se realizan las diluciones correspondientes para los puntos 0, 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300 y 400 ppm de Carbono preparados en un volumen de 40 mL.

Se preparan los puntos de la curva 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300 y 400 a partir de la disolución madre de 1000 ppm y para los puntos 1, 5 y 10 se parte de la disolución preparada de 25 ppm (Nota: Se recomienda preparar dos disoluciones de 25 ppm).

Para conocer la cantidad de Ftalato ácido de potasio de la disolución madre que se necesita para preparar los puntos de la curva se hace una relación:

- **400 ppm;** Se necesitan preparar 40 mL a una concentración de 400 mg/L ó 400 mg/1000 mL a partir de una disolución de 1000 mg/L ó 1000 mg/1000 mL

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{400 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 16 \text{ mL}$$

Se necesitan tomar **16 mL** de la disolución madre y llevarla a un volumen de 40 mL para preparar el punto de la curva de 400 ppm. De esta forma se realiza el mismo cálculo para los puntos 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300.

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{300 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 12 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{200 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 8 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{150 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 6 \text{ mL} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Cantidad que se toma de la} \\ \text{disolución madre y es llevada} \\ \text{a un volumen de 40 mL} \end{array}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{100 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 4 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{75 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 3 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{50 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 2 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{25 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 1 \text{ mL} \quad \longrightarrow \quad \text{Se realiza por duplicado}$$

- **10 ppm**; Se necesitan preparar 40 mL a una concentración de 10 mg/L ó 10 mg/1000 mL a partir de una disolución de 25 mg/L ó 25 mg/1000 mL

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{10 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{25 \text{ mg}} \right) = 16 \text{ mL}$$

Se necesitan **16 mL** de la disolución de 25 ppm y llevarla a un volumen de 40 mL para preparar el punto de la curva de 10 ppm. De la misma forma se realiza el mismo cálculo para los puntos 1 y 5.

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{5 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{25 \text{ mg}} \right) = 8 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{1 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{25 \text{ mg}} \right) = 1.6 \text{ mL}$$

Cantidad que se toma de la disolución de 25 ppm y es llevada a un volumen de 40 mL

*Nota: Todos los puntos de la curva son preparados utilizando agua desionizada.

**Nota: Para el punto 0 de la curva se utiliza agua desionizada con la que se prepara la curva.

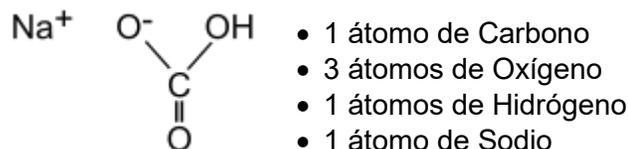
Elaboración de una curva de calibración para la determinación de Carbono Inorgánico utilizando Carbonato Ácido de Sodio (Bicarbonato de Sodio, NaHCO_3).

Para iniciar la elaboración de la curva de calibración se toma en cuenta lo siguiente:

1.0 g/L es lo mismo que 1000 ppm (mg/L)

Se parte con la idea de preparar una disolución madre de Carbonato ácido de sodio (Bicarbonato de Sodio) de una concentración de 1000 ppm de Carbono (%C) en un volumen de 100 mL.

Se tiene que en una molécula de Carbonato ácido de sodio hay:



Para conocer la Masa Molecular del Carbonato ácido de sodio es necesario realizar la suma de los Pesos Atómicos de cada uno de los átomos que lo componen utilizando los valores de una tabla periódica, prestando atención en la cantidad de Carbono presente en la molécula:

1 átomos de Carbono	1 átomo de C = 12.01 g/mol	1 x 12.01 = 12.01 g/mol
3 átomos de Oxígeno	1 átomo de O = 15.99 g/mol	3 x 15.99 = 47.97 g/mol
1 átomos de Hidrógeno	1 átomo de H = 1.00 g/mol	1 x 1.00 = 1.00 g/mol
1 átomo de Sodio	1 átomo de Na = 22.98 g/mol	1 x 22.98 = 22.98 g/mol
Carbonato ácido de Sodio = 83.96 g/mol		

Para conocer la cantidad de Carbonato ácido de sodio que se requiere pesar para preparar la disolución de 1000 ppm de Carbono se toman en cuenta las Masas Moleculares y Pesos Atómicos.

Una molécula de Carbonato ácido de sodio tiene una masa de **83.96 g** de donde **12.01 g** son de Carbono y para preparar la disolución se requiere de **1.0g** de Carbono por cada Litro, entonces se hace una relación:

$$(1.0 \cancel{gC}) \left(\frac{83.96 \cancel{g NaHCO_3}}{12.01 \cancel{gC}} \right) = 6.99 \text{ g}_{\text{NaHCO}_3}$$

Se requiere pesar **6.99 g** de Carbonato ácido de sodio para preparar 1.0 Litro de disolución, pero se necesitan solo 100 mL, entonces se hace otra relación:

1000 mL = 1.0 L
100 mL = 0.100 L

$$(0.1 \cancel{L}) \left(\frac{6.99 \cancel{g NaHCO_3}}{1.0 \cancel{L}} \right) = 0.699 \text{ g}_{\text{NaHCO}_3}$$

Para preparar la disolución madre de 1000 ppm de Carbono a partir de Carbonato ácido de sodio se requiere pesar **0.699 g** de dicha sal y llevarla a un volumen de 100 mL con agua desionizada.

Para preparar los diferentes puntos de la curva de calibración se parte de la disolución madre ya preparada de 1000 ppm de Carbono y se realizan las diluciones correspondientes para los puntos 0, 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300 y 400 ppm de Carbono preparados en un volumen de 40 mL.

Se preparan los puntos de la curva 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300 y 400 a partir de la disolución madre de 1000 ppm y para los puntos 1, 5 y 10 se parte de la disolución preparada de 25 ppm (Nota: Se recomienda preparar dos disoluciones de 25 ppm).

Para conocer la cantidad de Carbonato ácido de sodio de la disolución madre que se necesita para preparar los puntos de la curva se hace una relación:

- **400 ppm**; Se necesitan preparar 40 mL a una concentración de 400 mg/L ó 400 mg/1000 mL a partir de una disolución de 1000 mg/L ó 1000 mg/1000 mL

$$(40 \cancel{mL}) \left(\frac{400 \cancel{mg}}{1000 \cancel{mL}} \right) \left(\frac{1000 \cancel{mL}}{1000 \cancel{mg}} \right) = 16 \text{ mL}$$

Se necesitan tomar **16 mL** de la disolución madre y llevarla a un volumen de 40 mL para preparar el punto de la curva de 400 ppm. De esta forma se realiza el mismo cálculo para los puntos 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300.

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{300 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 12 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{200 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 8 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{150 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 6 \text{ mL} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Cantidad que se toma de la} \\ \text{disolución madre y es llevada} \\ \text{a un volumen de 40 mL} \end{array}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{100 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 4 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{75 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 3 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{50 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 2 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{25 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1000 \text{ mg}} \right) = 1 \text{ mL} \quad \longrightarrow \quad \text{Se realiza por duplicado}$$

- **10 ppm**; Se necesitan preparar 40 mL a una concentración de 10 mg/L ó 10 mg/1000 mL a partir de una disolución de 25 mg/L ó 25 mg/1000 mL

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{10 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{25 \text{ mg}} \right) = 16 \text{ mL}$$

Se necesitan **16 mL** de la disolución de 25 ppm y llevarla a un volumen de 40 mL para preparar el punto de la curva de 10 ppm. De la misma forma se realiza el mismo cálculo para los puntos 1 y 5.

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{5 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{25 \text{ mg}} \right) = 8 \text{ mL}$$

$$(40 \text{ mL}) \left(\frac{1 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mL}}{25 \text{ mg}} \right) = 1.6 \text{ mL}$$

⇒ Cantidad que se toma de la disolución de 25 ppm y es llevada a un volumen de 40 mL

*Nota: Todos los puntos de la curva son preparados utilizando agua desionizada.

**Nota: Para el punto 0 de la curva se utiliza agua desionizada con la que se prepara la curva.

8.5. Anexo V

A continuación se muestran los datos obtenidos del modelo WHAM utilizados para hacer las gráficas de distribución espacial de los iones metálicos en agua de los diferentes sitios de Xochimilco.

▪ Ampampilco

<i>Concentración Total [mgL⁻¹]</i>					
	AMP 1	AMP 2	AMP 3	AMP 4	AMP 5
V	3.158770344	3.194368264	3.079367828	2.997672944	2.971672403
Cr	0.276600533	0.140400389	0.089900217	0.094300127	0.105100237
Mn	4.719101066	3.061103861	2.795703664	2.902299951	3.102104123
Fe II	182.2741709	44.4711047	25.7418086	35.12572317	29.16348759
Fe III	182.2741709	44.4711047	25.7418086	35.12572317	29.16348759
Co	0.829903131	0.785102117	0.789504427	0.671402306	0.459501524
Ni	1.182507668	8.140539806	2.002812496	0.74140329	0.335802549
Cu	1.29070187	0.502500162	1.045598593	ND	0.986297466
Zn	10.8141789	4.151701918	4.223881438	18.60538274	3.240389712
Cd	0.005410194	0.002480089	0.00056002	0.003610131	0.001420047
Pb	0.207089977	0.197690556	0.05129754	0.22328908	0.056697172

Tabla 8.1. Concentración total de iones metálicos presentes en el agua del canal de Ampampilco, ND=No hay Dato.

<i>ión Libre [mgL⁻¹]</i>					
	AMP 1	AMP 2	AMP 3	AMP 4	AMP 5
V	0.028022257	0.027595316	0.017932631	0.023505834	0.027324511
Cr	3.12813E-06	9.04758E-07	2.38553E-07	5.43037E-07	7.16173E-07
Mn	2.551487577	1.708067738	1.477168633	1.621864454	1.741486551
Fe II	97.94263635	24.2239415	13.94237439	18.75347699	15.95385545
Fe III	2.10146E-14	2.72692E-14	3.13991E-14	1.68382E-14	2.74654E-14
Co	0.370784083	0.293278093	0.299128391	0.238944046	0.171180302
Ni	0.47065181	2.465498438	0.618634305	0.210397057	0.101152206
Cu	0.095981149	0.017997053	0.036828275	ND	0.034895968
Zn	5.102274814	1.733269566	1.733334946	7.56766962	1.352522598
Cd	0.002149266	0.001199772	0.000264678	0.00176246	0.000689206
Pb	0.028261666	0.01509568	0.003864902	0.014092936	0.004274474

Tabla 8.2. Concentración de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Ampampilco, ND=No hay Dato.

<i>Asociado a Sustancias Húmicas [mgL⁻¹]</i>					
	AMP 1	AMP 2	AMP 3	AMP 4	AMP 5
V	0.00685213	0.00798385	0.00581424	0.00742592	0.00738180
Cr	0.00052641	0.00014679	0.00003808	0.00011715	0.00011423
Mn	0.00092405	0.00164014	0.00290118	0.00136025	0.00165275
Fe II	0.01286241	0.00933050	0.01064038	0.00630425	0.00609488
Fe III	5.94E-16	6.86E-15	3.75E-14	5.53E-15	9.85E-15
Co	0.00003820	0.00009501	0.00019132	0.00006876	0.00005527
Ni	0.00006058	0.00099490	0.00049871	0.00007558	0.00004061
Cu	0.00048245	0.00022336	0.00101647	ND	0.00041009
Zn	0.00138526	0.00130953	0.00270938	0.00501058	0.00101250
Cd	0.00000034	0.00000053	0.00000024	0.00000069	0.00000031
Pb	0.00008508	0.00010919	0.00006072	0.00009215	0.00002995

Tabla 8.3. Concentración de metales asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de Ampampilco, ND=No hay Dato.

<i>Metal Inorgánico en Solución [mgL⁻¹]</i>					
	AMP 1	AMP 2	AMP 3	AMP 4	AMP 5
V	1.40	1.11	0.56	1.10	1.08
Cr	0.071	0.017	0.0040	0.014	0.013
Mn	2.08	1.18	0.996	1.14	1.19
Fe II	83.12	19.35	10.75	15.77	12.62
Fe III	0.000014	0.000014	0.000014	0.000013	0.000014
Co	0.46	0.48	0.47	0.43	0.28
Ni	0.71	5.58	1.34	0.52	0.23
Cu	1.15	0.46	0.90	ND	0.91
Zn	5.58	2.29	2.21	10.54	1.79
Cd	0.0032	0.0012	0.00027	0.0018	0.00070
Pb	0.17	0.17	0.041	0.20	0.049

Tabla 8.4. Concentración de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Ampampilco, ND=No hay Dato.

<i>Asociado a Partículas Suspensas [mgL⁻¹]</i>					
	AMP 1	AMP 2	AMP 3	AMP 4	AMP 5
V	1.73	2.05	2.50	1.86	1.86
Cr	0.21	0.12	0.086	0.080	0.092
Mn	0.091	0.17	0.32	0.14	0.17
Fe II	1.20	0.89	1.04	0.60	0.58
Fe III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Co	0.0034	0.0085	0.018	0.0061	0.0050
Ni	0.006	0.090	0.046	0.0067	0.0037
Cu	0.049	0.023	0.11	ND	0.041
Zn	0.13	0.13	0.28	0.49	0.10
Cd	3.16E-05	5.10E-05	2.36E-05	6.52E-05	2.92E-05
Pb	0.0087	0.011	0.0069	0.0093	0.0031

Tabla 8.5. Concentración de metal asociado a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Ampampilco, ND=No hay Dato.

<i>Ión Libre [%]</i>					
	AMP 1	AMP 2	AMP 3	AMP 4	AMP 5
V	0.9	0.9	0.6	0.8	0.9
Cr	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mn	54.1	55.8	52.8	55.9	56.1
Fe II	53.7	54.5	54.2	53.4	54.7
Fe III	1.15E-14	6.13E-14	1.22E-13	4.79E-14	9.42E-14
Co	44.7	37.4	37.9	35.6	37.3
Ni	39.8	30.3	30.9	28.4	30.1
Cu	7.4	3.6	3.5	ND	3.5
Zn	47.2	41.7	41.0	40.7	41.7
Cd	39.7	48.4	47.3	48.8	48.5
Pb	13.6	7.6	7.5	6.3	7.5

Tabla 8.6. Distribución porcentual de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Ampampilco, ND=No hay Dato.

<i>Asociado a Sustancias Húmicas [%]</i>					
	AMP 1	AMP 2	AMP 3	AMP 4	AMP 5
V	0.217	0.250	0.189	0.248	0.248
Cr	0.190	0.105	0.042	0.124	0.109
Mn	0.020	0.054	0.104	0.047	0.053
Fe II	0.007	0.021	0.041	0.018	0.021
Fe III	3.26E-16	1.54E-14	1.46E-13	1.57E-14	3.38E-14
Co	0.005	0.012	0.024	0.010	0.012
Ni	0.005	0.012	0.025	0.010	0.012
Cu	0.037	0.044	0.097	ND	0.042
Zn	0.013	0.032	0.064	0.027	0.031
Cd	0.006	0.022	0.043	0.019	0.021
Pb	0.041	0.055	0.118	0.041	0.053

Tabla 8.7. Distribución porcentual de iones metálicos asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de Ampampilco, ND=No hay Dato.

<i>Metal Inorgánico en Solución Reales [%]</i>					
	AMP 1	AMP 2	AMP 3	AMP 4	AMP 5
V	44.2	34.6	18.1	36.8	36.3
Cr	25.6	11.9	4.4	14.5	12.4
Mn	44.0	38.6	35.6	39.3	38.3
Fe II	45.6	43.5	41.7	44.9	43.3
Fe III	7.58E-06	3.18E-05	5.60E-05	3.75E-05	4.84E-05
Co	54.9	61.5	59.9	63.5	61.6
Ni	59.7	68.6	66.8	70.7	68.8
Cu	88.7	91.9	85.8	ND	92.2
Zn	51.6	55.1	52.3	56.7	55.1
Cd	59.7	49.5	48.5	49.4	49.4
Pb	82.1	86.6	79.0	89.5	87.0

Tabla 8.8. Distribución porcentual de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Ampampilco, ND=No hay Dato.

Concentración de Precipitado : Fe(III)(OH) ₃				
AMP 1	AMP 2	AMP 3	AMP 4	AMP 5
182.2741709 ^C	44.4711047 ^C	25.74175275 ^C	35.12566733 ^C	29.16348759 ^C
99.999992 ^P	99.999968 ^P	99.999944 ^P	99.999962 ^P	99.999952 ^P

Tabla 8.9. Concentración y distribución porcentual de Hierro en forma precipitada presente en el agua del canal de Ampampilco, c= concentración en mgL⁻¹, P= porcentaje %.

Asociado a Partículas Suspensas [%]					
	AMP 1	AMP 2	AMP 3	AMP 4	AMP 5
V	54.7	64.3	81.1	62.2	62.5
Cr	74.2	88.0	95.5	85.3	87.5
Mn	1.9	5.5	11.4	4.8	5.5
Fe II	0.7	2.0	4.1	1.7	2.0
Fe III	0	0	0	0	0
Co	0.4	1.1	2.2	0.9	1.1
Ni	0.5	1.1	2.3	0.9	1.1
Cu	3.8	4.5	10.6	ND	4.2
Zn	1.2	3.1	6.6	2.6	3.1
Cd	0.6	2.1	4.2	1.8	2.1
Pb	4.2	5.7	13.4	4.2	5.4

Tabla 8.10. Distribución porcentual de metales asociados a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Ampampilco, ND=No hay Dato.

	<i>Ión Libre</i>	<i>Metal Asociado a SH</i>	<i>Metal Inorgánico</i>	<i>Metal Asociado a PS</i>	<i>Metal Precipitado</i>
V	0.81	0.23	34.02	64.95	0.00
Cr	6.60E-04	0.11	13.76	86.13	0.00
Mn	54.94	0.055	39.18	5.82	0.00
Fe II	54.09	0.022	43.81	2.08	0.00
Fe III	6.74E-14	4.22E-14	3.62E-05	ND	99.9999637529
Co	38.55	0.013	60.29	1.15	0.00
Ni	31.90	0.013	66.92	1.17	0.00
Cu	4.52	0.055	89.66	5.77	0.00
Zn	42.48	0.033	54.16	3.33	0.00
Cd	46.54	0.022	51.29	2.14	0.00
Pb	8.53	0.062	84.83	6.57	0.00

Tabla 8.11. Distribución porcentual promedio de iones metálicos presentes en el agua del canal de Ampampilco, ND=No hay Dato (Indicado en Figura 5.5).

▪ **Apatlaco.**

Concentración Total [mgL⁻¹]					
	APA 1	APA 2	APA 3	APA 4	APA 5
V	2.50457451	3.76526456	3.09856768	6.09902203	2.9885697
Cr	0.13880047	0.12150033	0.11560033	0.33290087	0.113
Mn	5.60598789	5.22830531	5.60708665	9.95312543	4.84770553
Fe II	20.0157974	25.4391845	19.0979848	57.3583995	30.7222891
Fe III	20.0157974	25.4391845	19.0979848	57.3583995	30.7222891
Co	0.51580158	0.32890085	0.3853011	0.40920145	0.55570171
Ni	0.41530276	0.3796025	0.37970286	0.47790338	0.26020193
Cu	1.14509892	2.15309735	0.73199908	2.19989897	0.82989805
Zn	7.41618416	3.6914921	2.60426846	6.66960994	3.83031999
Cd	0.02472085	0.00144005	ND	0.00318011	ND
Pb	0.43127851	ND	ND	0.05329743	0.07819624

Tabla 8.12. Concentración total de iones metálicos presentes en el agua del canal de Apatlaco, ND=No hay Dato.

Ión Libre [mgL⁻¹]					
	APA 1	APA 2	APA 3	APA 4	APA 5
V	0.00809598	0.03009833	0.02097409	0.04019809	0.03325206
Cr	1.7549E-07	8.4169E-07	4.7613E-07	3.1081E-06	1.0482E-06
Mn	2.65358993	2.71356579	2.85334466	5.26111981	2.62782399
Fe II	9.45779751	12.4912421	9.26038544	28.2453399	16.0517517
Fe III	1.6941E-14	2.1112E-14	1.8153E-14	1.4546E-14	4.8073E-14
Co	0.15132276	0.10052647	0.11518611	0.12720789	0.18279839
Ni	0.09427451	0.09056157	0.08800841	0.11609202	0.06752265
Cu	0.02526722	0.05459046	0.01754079	0.0581301	0.02310501
Zn	2.47344962	1.31041788	0.90478074	2.42891277	1.43712432
Cd	0.01047275	0.00063275	ND	0.00142098	ND
Pb	0.01914074	ND	ND	0.00275607	0.00538231

Tabla 8.13. Concentración de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Apatlaco, ND=No hay Dato.

<i>Asociado a Sustancias Húmicas [mgL⁻¹]</i>					
	APA 1	APA 2	APA 3	APA 4	APA 5
V	0.00294611	0.00902031	0.00763433	0.01114628	0.00736274
Cr	0.00004445	0.00016007	0.00010672	0.00066040	0.00011750
Mn	0.00613963	0.00229893	0.00343382	0.00309749	0.00217665
Fe II	0.00756954	0.00417504	0.00423830	0.00702328	0.00525277
Fe III	5.16E-14	7.83E-15	1.60E-14	1.41E-15	1.33E-14
Co	0.00010072	0.00002897	0.00004496	0.00002809	0.00005165
Ni	0.00008259	0.00003278	0.00004373	0.00003177	0.00002398
Cu	0.00108451	0.00057677	0.00029816	0.00039609	0.00024733
Zn	0.00451657	0.00087861	0.00086067	0.00115128	0.00094332
Cd	0.00001028	0.00000025	ND	0.00000041	ND
Pb	0.00044016	ND	ND	0.00001150	0.00003319

Tabla 8.14. Concentración de metales asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de Apatlaco, ND=No hay Dato.

<i>Metal Inorgánico en Solución [mgL⁻¹]</i>					
	APA 1	APA 2	APA 3	APA 4	APA 5
V	0.27	1.47	0.93	2.83	1.12
Cr	0.0046	0.019	0.012	0.091	0.013
Mn	2.26	2.28	2.39	4.38	2.00
Fe II	9.81	12.55	9.43	28.45	14.17
Fe III	1.33E-05	1.37E-05	1.34E-05	1.30E-05	1.55E-05
Co	0.36	0.23	0.27	0.28	0.37
Ni	0.31	0.29	0.29	0.36	0.19
Cu	1.00	2.04	0.68	2.10	0.78
Zn	4.47	2.29	1.61	4.13	2.30
Cd	0.013	0.00078	ND	0.0017	ND
Pb	0.36	ND	ND	0.049	0.069

Tabla 8.15. Concentración de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Apatlaco, ND=No hay Dato.

<i>Asociado a Partículas Suspendidas [mgL⁻¹]</i>					
	APA 1	APA 2	APA 3	APA 4	APA 5
V	2.23	2.25	2.14	3.21	1.83
Cr	0.13	0.10	0.10	0.24	0.10
Mn	0.69	0.23	0.36	0.31	0.22
Fe II	0.74	0.40	0.41	0.66	0.50
Fe III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Co	0.0092	0.0026	0.0041	0.0025	0.0046
Ni	0.0076	0.0029	0.0039	0.0028	0.0021
Cu	0.12	0.057	0.030	0.038	0.024
Zn	0.46	0.086	0.085	0.11	0.092
Cd	0.0010	0.000024	ND	0.000038	ND
Pb	0.049	ND	ND	0.0011	0.0034

Tabla 8.16. Concentración de metal asociado a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Apatlaco, ND=No hay Dato.

<i>Ión Libre [%]</i>					
	APA 1	APA 2	APA 3	APA 4	APA 5
V	0.3	0.8	0.7	0.7	1.1
Cr	1.26E-04	6.93E-04	4.12E-04	9.34E-04	9.28E-04
Mn	47.3	51.9	50.9	52.9	54.2
Fe II	47.3	49.1	48.5	49.2	52.2
Fe III	8.46E-14	8.30E-14	9.51E-14	2.54E-14	1.56E-13
Co	29.3	30.6	29.9	31.1	32.9
Ni	22.7	23.9	23.2	24.3	26.0
Cu	2.2	2.5	2.4	2.6	2.8
Zn	33.4	35.5	34.7	36.4	37.5
Cd	42.4	43.9	ND	44.7	ND
Pb	4.4	ND	ND	5.2	6.9

Tabla 8.17. Distribución porcentual de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Apatlaco, ND=No hay Dato.

<i>Asociado a Sustancias Húmicas [%]</i>					
	APA 1	APA 2	APA 3	APA 4	APA 5
V	0.12	0.24	0.25	0.18	0.25
Cr	0.03	0.13	0.09	0.20	0.10
Mn	0.11	0.04	0.06	0.03	0.04
Fe II	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02
Fe III	2.58E-13	3.08E-14	8.36E-14	2.46E-15	4.32E-14
Co	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Ni	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Cu	0.09	0.03	0.04	0.02	0.03
Zn	0.06	0.02	0.03	0.02	0.02
Cd	0.04	0.02	ND	0.01	ND
Pb	0.10	ND	ND	0.02	0.04

Tabla 8.18. Distribución porcentual de iones metálicos asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de Apatlaco, ND=No hay Dato.

<i>Metal Inorgánico en Solución [%]</i>					
	APA 1	APA 2	APA 3	APA 4	APA 5
V	10.7	39.1	29.9	46.5	37.3
Cr	3.3	15.6	10.3	27.3	11.8
Mn	40.3	43.6	42.7	44.0	41.2
Fe II	49.0	49.3	49.4	49.6	46.1
Fe III	6.64E-05	5.38E-05	7.02E-05	2.27E-05	5.04E-05
Co	68.9	68.6	69.0	68.3	66.3
Ni	75.5	75.4	75.8	75.1	73.2
Cu	87.4	94.8	93.5	95.6	94.2
Zn	60.3	62.2	62.0	61.9	60.1
Cd	53.5	54.4	ND	54.1	ND
Pb	84.2	ND	ND	92.7	88.8

Tabla 8.19. Distribución porcentual de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Apatlaco, ND=No hay Dato.

Concentración de Precipitado : Fe(III)(OH) ₃				
APA 1	APA 2	APA 3	APA 4	APA 5
20.0157974 ^C	25.43918454 ^C	19.09798479 ^C	57.3583995 ^C	30.72228908 ^C
99.99993364 ^P	99.99994617 ^P	99.99992983 ^P	99.99997729 ^P	99.99994962 ^P

Tabla 8.20. Concentración y distribución porcentual de Hierro en forma precipitada presente en el agua del canal de Apatlaco, c= concentración en mgL⁻¹, P= porcentaje %.

Asociado a Partículas Suspensas [%]					
	APA 1	APA 2	APA 3	APA 4	APA 5
V	88.8	59.8	69.2	52.7	61.3
Cr	96.7	84.3	89.6	72.5	88.1
Mn	12.2	4.5	6.4	3.1	4.6
Fe II	3.7	1.6	2.1	1.1	1.6
Fe III	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Co	1.8	0.8	1.1	0.6	0.8
Ni	1.8	0.8	1.0	0.6	0.8
Cu	10.3	2.6	4.1	1.7	2.9
Zn	6.3	2.3	3.3	1.7	2.4
Cd	4.1	1.6	ND	1.2	ND
Pb	11.2	ND	ND	2.1	4.3

Tabla 8.21. Distribución porcentual de metales asociados a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Apatlaco, ND=No hay Dato.

	<i>Ión Libre</i>	<i>Metal Asociado a SH</i>	<i>Metal Inorgánico</i>	<i>Metal Asociado a PS</i>	<i>Metal Precipitado</i>
V	0.71	0.21	32.71	66.37	0.00
Cr	6.18E-04	0.11	13.65	86.23	0.00
Mn	51.4	0.058	42.36	6.15	0.00
Fe II	49.3	0.021	48.68	2.04	0.00
Fe III	8.89E-14	8.36E-14	5.27E-05	ND	99.99994731
Co	30.8	0.011	68.22	1.01	0.00
Ni	24.0	0.011	74.99	1.01	0.00
Cu	2.5	0.042	93.10	4.35	0.00
Zn	35.5	0.032	61.28	3.19	0.00
Cd	43.7	0.024	53.99	2.32	0.00
Pb	5.5	0.055	88.56	5.88	0.00

Tabla 8.22. Distribución porcentual promedio de iones metálicos presentes en el agua del canal de Apatlaco, ND=No hay Dato (**Indicado en Figura 5.6**).

▪ **Asunción.**

Concentración Total [mgL⁻¹]					
	ASN 1	ASN 2	ASN 3	ASN 4	ASN 5
V	2.75007178	2.19497754	1.90298086	2.07767964	2.03867883
Cr	0.07440018	0.05950018	0.0546999	0.0642001	0.10550009
Mn	2.89320221	3.85230509	3.30560013	3.71320196	3.44420332
Fe II	14.7058872	26.8486007	15.1800113	19.5100092	91.011155
Fe III	14.7058872	26.8486007	15.1800113	19.5100092	91.011155
Co	0.48900171	0.19630058	0.20320047	0.12410034	0.07299996
Ni	0.24520166	0.09180059	0.27620175	0.18530152	0.78840496
Cu	2.12089859	0.86059712	1.28950085	0.8432999	0.88949784
Zn	7.70679826	2.31728949	13.5197341	4.40548746	3.56130744
Cd	0.00110004	0.00328012	0.00040001	0.00346013	0.00119004
Pb	0.08839566	0.05099751	0.2337879	0.07329638	0.15419265

Tabla 8.23. Concentración total de iones metálicos presentes en el agua del canal de Asunción.

ión Libre [mgL⁻¹]					
	ASN 1	ASN 2	ASN 3	ASN 4	ASN 5
V	0.0288928	0.00036712	0.000365	0.00026087	0.00045279
Cr	3.9874E-07	2.5117E-09	2.706E-09	1.9124E-09	6.5798E-09
Mn	1.52044333	0.76840743	0.64638454	0.58270586	0.91333949
Fe II	8.11494864	10.8600655	6.12228735	7.25527071	41.2455533
Fe III	3.3543E-13	1.0562E-13	1.6811E-13	1.3667E-13	1.0871E-13
Co	0.17576295	0.05513112	0.0590434	0.03447427	0.02464757
Ni	0.07078894	0.01947101	0.06157877	0.03882727	0.21215903
Cu	0.06365339	0.00425733	0.00715528	0.00299348	0.00656608
Zn	2.9760976	0.47352707	2.78847661	0.76960106	0.94868341
Cd	0.00053418	0.00112566	0.00013555	0.00104774	0.00044183
Pb	0.00879253	0.00071102	0.00336799	0.00075882	0.00332533

Tabla 8.24. Concentración de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Asunción.

<i>Asociado a Sustancias Húmicas [mgL⁻¹]</i>					
	ASN 1	ASN 2	ASN 3	ASN 4	ASN 5
V	0.00416528	0.00005260	0.00004561	0.00003405	0.00006486
Cr	0.00001390	0.00000018	0.00000015	0.00000012	0.00000047
Mn	0.00315963	0.00869426	0.00734888	0.00725199	0.00860381
Fe II	0.00648750	0.05372315	0.03187332	0.04481192	0.14920779
Fe III	5.64E-13	1.27E-11	3.30E-11	3.45E-11	2.73E-12
Co	0.00011971	0.00023745	0.00027185	0.00019299	0.00007439
Ni	0.00006135	0.00012514	0.00040547	0.00032167	0.00091343
Cu	0.00187438	0.00134833	0.00205013	0.00094116	0.00142740
Zn	0.00497121	0.00582826	0.03419510	0.01102149	0.00846843
Cd	0.00000051	0.00000736	0.00000091	0.00000849	0.00000215
Pb	0.00013605	0.00007662	0.00030972	0.00007815	0.00025323

Tabla 8.25. Concentración de metales asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de Asunción.

<i>Metal Inorgánico en Solución [mgL⁻¹]</i>					
	ASN 1	ASN 2	ASN 3	ASN 4	ASN 5
V	0.37	0.0049	0.0042	0.0031	0.01
Cr	1.42E-03	1.83E-05	1.48E-05	1.15E-05	4.69E-05
Mn	1.02	0.54	0.44	0.40	0.64
Fe II	5.95	8.92	4.75	5.68	32.01
Fe III	2.24E-05	1.77E-05	1.93E-05	1.85E-05	1.78E-05
Co	0.30	0.12	0.11	0.07	0.04
Ni	0.17	0.06	0.17	0.11	0.48
Cu	1.85	0.16	0.25	0.10	0.17
Zn	4.22	0.79	4.35	1.20	1.29
Cd	5.15E-04	1.09E-03	1.32E-04	1.02E-03	4.81E-04
Pb	0.06	0.01	0.03	0.01	0.03

Tabla 8.26. Concentración de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Asunción.

<i>Asociado a Partículas Suspendidas [mgL⁻¹]</i>					
	ASN 1	ASN 2	ASN 3	ASN 4	ASN 5
V	2.34	2.19	1.90	2.07	2.03
Cr	0.073	0.059	0.055	0.064	0.11
Mn	0.35	2.53	2.21	2.73	1.88
Fe II	0.64	7.01	4.27	6.53	17.60
Fe III	0.000033	0.0019	0.0026	0.0037	0.0011
Co	0.011	0.025	0.029	0.022	0.0075
Ni	0.006	0.014	0.045	0.038	0.10
Cu	0.20	0.69	1.03	0.73	0.71
Zn	0.51	1.05	6.35	2.42	1.32
Cd	0.00005	0.0011	0.00013	0.0014	0.00026
Pb	0.016	0.042	0.20	0.064	0.12

Tabla 8.27. Concentración de metal asociado a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Asunción.

<i>Ión Libre [%]</i>					
	ASN 1	ASN 2	ASN 3	ASN 4	ASN 5
V	1.05	0.02	0.02	0.01	0.02
Cr	5.36E-04	4.22E-06	4.95E-06	2.98E-06	6.24E-06
Mn	52.55	19.95	19.55	15.69	26.52
Fe II	55.18	40.45	40.33	37.19	45.32
Fe III	2.28E-12	3.93E-13	1.11E-12	7.01E-13	1.19E-13
Co	35.94	28.09	29.06	27.78	33.76
Ni	28.87	21.21	22.29	20.95	26.91
Cu	3.00	0.49	0.55	0.35	0.74
Zn	38.62	20.43	20.63	17.47	26.64
Cd	48.56	34.32	33.89	30.28	37.13
Pb	9.95	1.39	1.44	1.04	2.16

Tabla 8.28. Distribución porcentual de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de Asunción.

<i>Asojado a Sustancias Húmicas [%]</i>					
	ASN 1	ASN 2	ASN 3	ASN 4	ASN 5
V	0.15	2.40E-03	2.40E-03	1.64E-03	3.18E-03
Cr	0.02	3.07E-04	2.70E-04	1.79E-04	4.45E-04
Mn	0.11	0.23	0.22	0.20	0.25
Fe II	0.04	0.20	0.21	0.23	0.16
Fe III	3.83E-12	4.72E-11	2.17E-10	1.77E-10	3.00E-12
Co	0.02	0.12	0.13	0.16	0.10
Ni	0.03	0.14	0.15	0.17	0.12
Cu	0.09	0.16	0.16	0.11	0.16
Zn	0.06	0.25	0.25	0.25	0.24
Cd	0.05	0.22	0.23	0.25	0.18
Pb	0.15	0.15	0.13	0.11	0.16

Tabla 8.29. Distribución porcentual de iones metálicos asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de Asunción.

<i>Metal Inorgánico en Solución [%]</i>					
	ASN 1	ASN 2	ASN 3	ASN 4	ASN 5
V	13.60	0.22	0.22	0.15	0.29
Cr	1.90	0.03	0.03	0.02	0.04
Mn	35.22	14.04	13.38	10.71	18.61
Fe II	40.44	33.24	31.32	29.13	35.17
Fe III	1.52E-04	6.58E-05	1.27E-04	9.48E-05	1.96E-05
Co	61.80	59.03	56.43	54.50	55.82
Ni	68.81	63.71	61.25	58.27	60.82
Cu	87.45	18.89	19.19	12.41	19.27
Zn	54.70	33.88	32.16	27.34	36.18
Cd	46.84	33.27	33.04	29.55	40.45
Pb	71.32	16.96	14.23	11.07	18.48

Tabla 8.30. Distribución porcentual de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de Asunción.

Concentración de Precipitado : Fe(III)(OH) ₃				
ASN 1	ASN 2	ASN 3	ASN 4	ASN 5
14.7058314 ^C	26.8466461 ^C	15.1773866 ^C	19.5063234 ^C	91.0100381 ^C
99.999848 ^P	99.999934 ^P	99.999873 ^P	99.999905 ^P	99.999980 ^P

Tabla 8.31. Concentración y distribución porcentual de Hierro en forma precipitada presente en el agua del canal de Asunción, c= concentración en mgL⁻¹, P= porcentaje %.

Asociado a Partículas Suspendidas [%]					
	ASN 1	ASN 2	ASN 3	ASN 4	ASN 5
V	85.2	99.8	99.8	99.8	99.7
Cr	98.1	99.969	99.973	99.982	99.955
Mn	12.1	65.8	66.8	73.4	54.6
Fe II	4.3	26.1	28.1	33.5	19.3
Fe III	0.00023	0.00721	0.01716	0.01880	0.00121
Co	2.2	12.8	14.4	17.6	10.3
Ni	2.3	14.9	16.3	20.6	12.2
Cu	9.5	80.5	80.1	87.1	79.8
Zn	6.6	45.4	47.0	54.9	36.9
Cd	4.6	32.2	32.8	39.9	22.2
Pb	18.6	81.5	84.2	87.8	79.2

Tabla 8.32. Distribución porcentual de metales asociados a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de Asunción.

	<i>Ión Libre</i>	<i>Metal Asociado a SH</i>	<i>Metal Inorgánico</i>	<i>Metal Asociado a PS</i>	<i>Metal Precipitado</i>
V	0.22	0.032	2.90	96.85	0.00
Cr	1.11E-04	3.98E-03	0.40	99.59	0.00
Mn	26.85	0.20	18.39	54.55	0.00
Fe II	43.69	0.17	33.86	22.28	0.00
Fe III	9.20E-13	8.97E-11	9.20E-05	0.0089	99.9999080
Co	30.93	0.11	57.52	11.45	0.00
Ni	24.05	0.12	62.57	13.26	0.00
Cu	1.03	0.14	31.44	67.39	0.00
Zn	24.76	0.21	36.85	38.18	0.00
Cd	36.83	0.18	36.63	26.35	0.00
Pb	3.19	0.14	26.41	70.25	0.00

Tabla 8.33. Distribución porcentual promedio de iones metálicos presentes en el agua del canal de Asunción (Indicado en Figura 5.7).

- **La Draga.**

Concentración Total [mgL⁻¹]					
	DRAG 1	DRAG 2	DRAG 3	DRAG 4	DRAG 5
V	2.14987903	2.59037528	2.24077904	2.30707941	2.13508052
Cr	0.07239989	0.15690031	0.12940009	0.08199993	0.08980038
Mn	3.01050043	3.15540501	2.48290292	1.96910036	1.86589925
Fe II	31.5281883	44.7346931	30.3747098	32.751473	32.5985135
Fe III	31.5281883	44.7346931	30.3747098	32.751473	32.5985135
Co	0.1029003	0.11220055	0.08960026	0.12100046	0.05240015
Ni	0.34380246	0.35280251	0.18430138	0.22960154	0.32710243
Cu	1.48229941	0.70569739	0.4602999	0.7809994	0.35230029
Zn	6.27347906	4.80157258	ND	3.94306126	4.1833393
Cd	0.00555019	0.00136005	0.00240008	ND	0.00221008
Pb	0.21248982	0.07049669	0.00589971	0.09289543	0.0965954

Tabla 8.34. Concentración total de iones metálicos presentes en el agua del canal de La Draga, ND=No hay Dato.

ión Libre [mgL⁻¹]					
	DRAG 1	DRAG 2	DRAG 3	DRAG 4	DRAG 5
V	3.9017E-05	0.00039344	0.0001549	0.00020146	0.00016622
Cr	2.7772E-10	6.6314E-09	2.8185E-09	1.6467E-09	1.5445E-09
Mn	0.42582313	0.82878984	0.59216619	0.35476462	0.32321205
Fe II	9.76622945	16.9543186	13.4440136	12.7699645	12.7087025
Fe III	3.9989E-16	9.7719E-15	1.2682E-14	2.1503E-14	2.4335E-14
Co	0.0242958	0.02621219	0.04151602	0.0364978	0.01623668
Ni	0.05819926	0.06104877	0.07895554	0.05330617	0.07817785
Cu	0.00428048	0.00512555	0.0026217	0.00341956	0.00122285
Zn	1.03233712	1.07761931	ND	0.79285672	0.82377492
Cd	0.00165825	0.0004724	0.00056183	ND	0.00071984
Pb	0.00126719	0.00111456	0.00011133	0.00107073	0.00104718

Tabla 8.35. Concentración de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal La Draga, ND=No hay Dato.

<i>Asociado a Sustancias Húmicas [mgL⁻¹]</i>					
	DRAG 1	DRAG 2	DRAG 3	DRAG 4	DRAG 5
V	0.00003336	0.00012439	0.00004713	0.00004778	0.00003743
Cr	0.00000090	0.00000237	0.00000092	0.00000035	0.00000029
Mn	0.00570291	0.00791904	0.00619591	0.00421718	0.00389194
Fe II	0.06641127	0.05418437	0.04032496	0.06804650	0.06909056
Fe III	2.32E-13	4.64E-13	1.97E-12	3.40E-12	4.92E-12
Co	0.00013584	0.00006679	0.00008450	0.00016312	0.00007374
Ni	0.00049363	0.00023432	0.00026298	0.00035255	0.00053331
Cu	0.00169324	0.00169222	0.00006073	0.00090619	0.00031083
Zn	0.01556812	0.00969966	ND	0.00995856	0.01051159
Cd	0.00001354	0.00000204	0.00000287	ND	0.00000520
Pb	0.00045059	0.00017698	0.00000304	0.00013228	0.00012159

Tabla 8.36. Concentración de metales asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de La Draga, ND=No hay Dato.

<i>Metal Inorgánico en Solución [mgL⁻¹]</i>					
	DRAG 1	DRAG 2	DRAG 3	DRAG 4	DRAG 5
V	3.28E-03	1.19E-02	4.53E-03	4.55E-03	3.56E-03
Cr	9.02E-05	2.38E-04	9.24E-05	3.48E-05	2.94E-05
Mn	0.33	0.81	0.57	0.25	0.23
Fe II	12.74	21.71	12.24	10.79	10.42
Fe III	9.50E-06	1.24E-05	1.30E-05	1.36E-05	1.38E-05
Co	0.064	0.079	0.039	0.067	0.028
Ni	0.23	0.27	0.074	0.14	0.19
Cu	0.19	0.27	0.0035	0.10	0.03
Zn	1.70	2.40	ND	1.13	1.12
Cd	0.0017	0.0006	0.0015	ND	6.93E-04
Pb	0.063	0.033	0.00021	0.015	0.013

Tabla 8.37. Concentración de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de La Draga, ND=No hay Dato.

<i>Asociado a Partículas Suspendidas [mgL⁻¹]</i>					
	DRAG 1	DRAG 2	DRAG 3	DRAG 4	DRAG 5
V	2.15	2.58	2.24	2.30	2.13
Cr	0.072	0.16	0.13	0.082	0.090
Mn	2.25	1.51	1.32	1.36	1.31
Fe II	8.95	6.02	4.65	9.13	9.41
Fe III	4.63E-05	1.55E-04	4.90E-04	7.68E-04	1.16E-03
Co	0.015	0.0065	0.0091	0.018	0.0082
Ni	0.055	0.023	0.031	0.040	0.062
Cu	1.29	0.43	0.45	0.68	0.32
Zn	3.53	1.31	ND	2.01	2.23
Cd	0.0022	0.00024	0.00032	ND	0.00079
Pb	0.15	0.036	0.0056	0.077	0.082

Tabla 8.38. Concentración de metal asociado a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de La Draga, ND=No hay Dato.

<i>Ión Libre [%]</i>					
	DRAG 1	DRAG 2	DRAG 3	DRAG 4	DRAG 5
V	0.0018	0.0152	0.0069	0.0087	0.0078
Cr	3.84E-07	4.23E-06	2.18E-06	2.01E-06	1.72E-06
Mn	14.14	26.27	23.85	18.02	17.32
Fe II	30.98	37.90	44.26	38.99	38.99
Fe III	1.27E-15	2.18E-14	4.18E-14	6.57E-14	7.47E-14
Co	23.61	23.36	46.33	30.16	30.99
Ni	16.93	17.30	42.84	23.22	23.90
Cu	0.29	0.73	0.57	0.44	0.35
Zn	16.46	22.44	ND	20.11	19.69
Cd	29.88	34.73	23.41	ND	32.57
Pb	0.60	1.58	1.89	1.15	1.08

Tabla 8.39. Distribución porcentual de metales libres o iones libres (biodisponibles) presentes en el agua del canal de La Draga, ND=No hay Dato.

<i>Asociado a Sustancias Húmicas [%]</i>					
	DRAG 1	DRAG 2	DRAG 3	DRAG 4	DRAG 5
V	0.0016	0.0048	0.0021	0.0021	0.0018
Cr	0.0012	0.0015	0.0007	0.0004	0.0003
Mn	0.19	0.25	0.25	0.21	0.21
Fe II	0.21	0.12	0.13	0.21	0.21
Fe III	7.37E-13	1.04E-12	6.48E-12	1.04E-11	1.51E-11
Co	0.13	0.060	0.094	0.13	0.14
Ni	0.14	0.066	0.14	0.15	0.16
Cu	0.11	0.24	0.013	0.12	0.088
Zn	0.25	0.20	ND	0.25	0.25
Cd	0.24	0.15	0.12	ND	0.24
Pb	0.21	0.25	0.05	0.14	0.13

Tabla 8.40. Distribución porcentual de iones metálicos asociados a sustancias húmicas presentes en el agua del canal de La Draga, ND=No hay Dato.

<i>Metal Inorgánico en Solución [%]</i>					
	DRAG 1	DRAG 2	DRAG 3	DRAG 4	DRAG 5
V	0.15	0.46	0.20	0.20	0.17
Cr	0.12	0.15	0.07	0.04	0.03
Mn	11.08	25.70	22.77	12.77	12.09
Fe II	40.41	48.52	40.31	32.94	31.95
Fe III	3.01E-05	2.76E-05	4.29E-05	4.16E-05	4.25E-05
Co	62.05	70.79	43.45	54.97	53.28
Ni	67.02	76.05	40.25	59.05	56.83
Cu	12.84	38.80	0.77	12.93	9.42
Zn	27.06	50.06	ND	28.73	26.84
Cd	30.38	47.47	63.01	ND	31.34
Pb	29.63	47.21	3.56	16.00	13.65

Tabla 8.41. Distribución porcentual de metales asociados a aniones inorgánicos presentes en el agua del canal de La Draga, ND=No hay Dato.

Concentración de Precipitado : Fe(III)(OH) ₃				
DRAG 1	DRAG 2	DRAG 3	DRAG 4	DRAG 5
31.5281324 ^C	44.7345256 ^C	30.3742072 ^C	32.7506912 ^C	32.5973408 ^C
99.999970 ^P	99.999972 ^P	99.999957 ^P	99.999958 ^P	99.999958 ^P

Tabla 8.42. Concentración y distribución porcentual de Hierro en forma precipitada presente en el agua del canal de La Draga, c= concentración en mgL⁻¹, P= porcentaje %.

Asociado a Partículas Suspendidas [%]					
	DRAG 1	DRAG 2	DRAG 3	DRAG 4	DRAG 5
V	99.8	99.5	99.8	99.8	99.8
Cr	99.9	99.8	99.9	100.0	100.0
Mn	74.6	47.8	53.1	69.0	70.4
Fe II	28.4	13.5	15.3	27.9	28.9
Fe III	0.00015	0.00035	0.00161	0.00235	0.00356
Co	14.2	5.8	10.1	14.7	15.6
Ni	15.9	6.6	16.8	17.6	19.1
Cu	86.8	60.2	98.6	86.5	90.1
Zn	56.2	27.3	ND	50.9	53.2
Cd	39.5	17.6	13.5	ND	35.9
Pb	69.6	51.0	94.5	82.7	85.1

Tabla 8.43. Distribución porcentual de metales asociados a partículas suspendidas presentes en el agua del canal de La Draga, ND=No hay Dato.

	<i>Ión Libre</i>	<i>Metal Asociado a SH</i>	<i>Metal Inorgánico</i>	<i>Metal Asociado a PS</i>	<i>Metal Precipitado</i>
V	0.0081	0.0025	0.2356	99.7539	0.0000
Cr	2.10E-06	8.44E-04	0.0845	99.9146	0.0000
Mn	19.92	0.22	16.8840	62.9738	0.0000
Fe II	38.22	0.18	38.8271	22.7735	0.0000
Fe III	4.10E-14	6.75E-12	3.69E-05	0.0016	99.9999631
Co	30.89	0.11	56.9079	12.0884	0.0000
Ni	24.84	0.13	59.8412	15.1871	0.0000
Cu	0.47	0.11	14.9507	84.4611	0.0000
Zn	19.67	0.24	33.1724	46.9146	0.0000
Cd	30.15	0.19	43.0508	26.6143	0.0000
Pb	1.26	0.16	22.0087	76.5745	0.0000

Tabla 8.44. Distribución porcentual promedio de iones metálicos presentes en el agua del canal de La Draga (Indicado en Figura 5.8).

8.6. Anexo VI

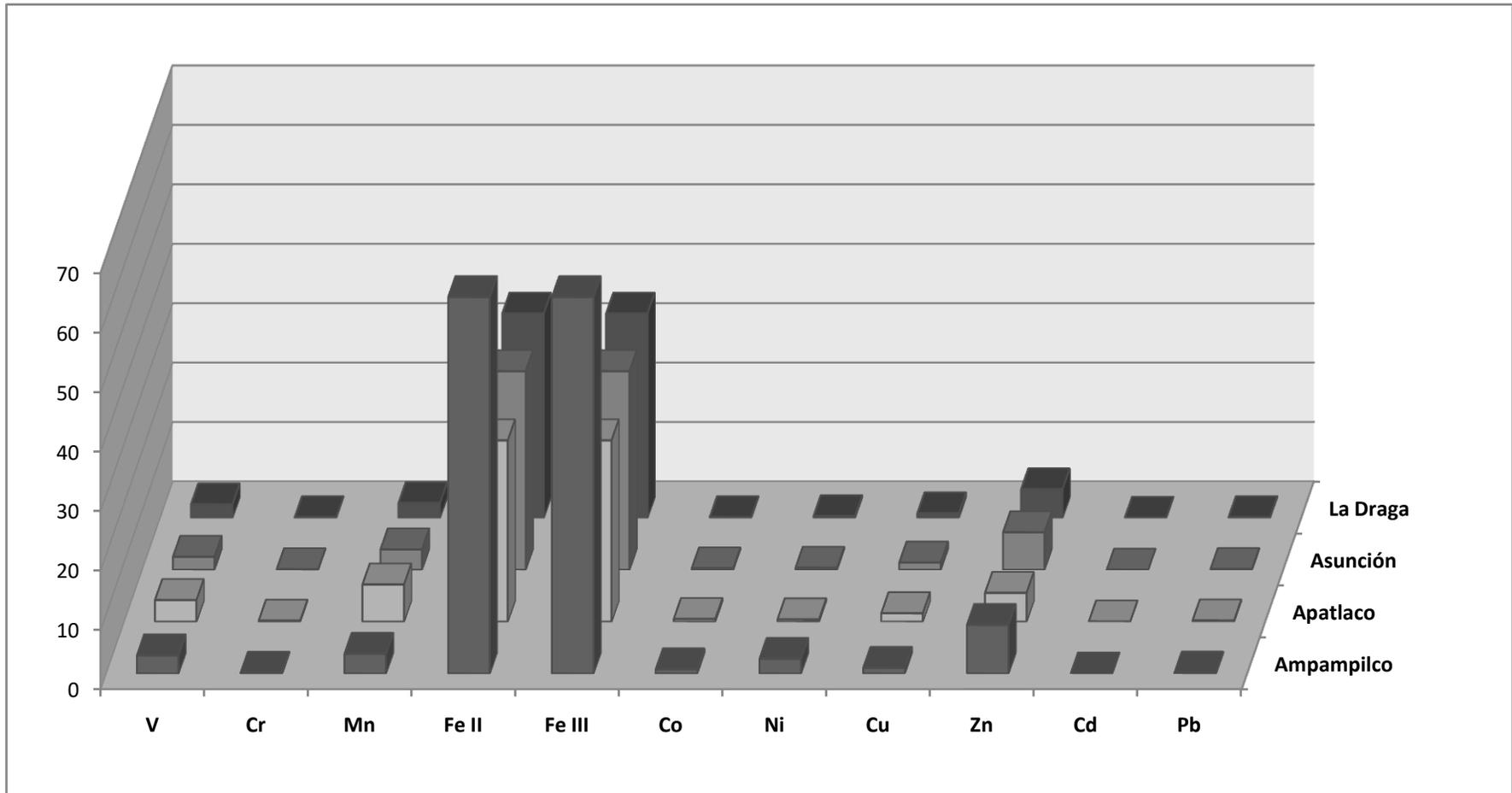


Figura 8.1. Concentración de metales en Partículas Suspendidas al hacer la resta de [Agua+PS]-[Agua ICP (fase coloidal)]= Metales en PS

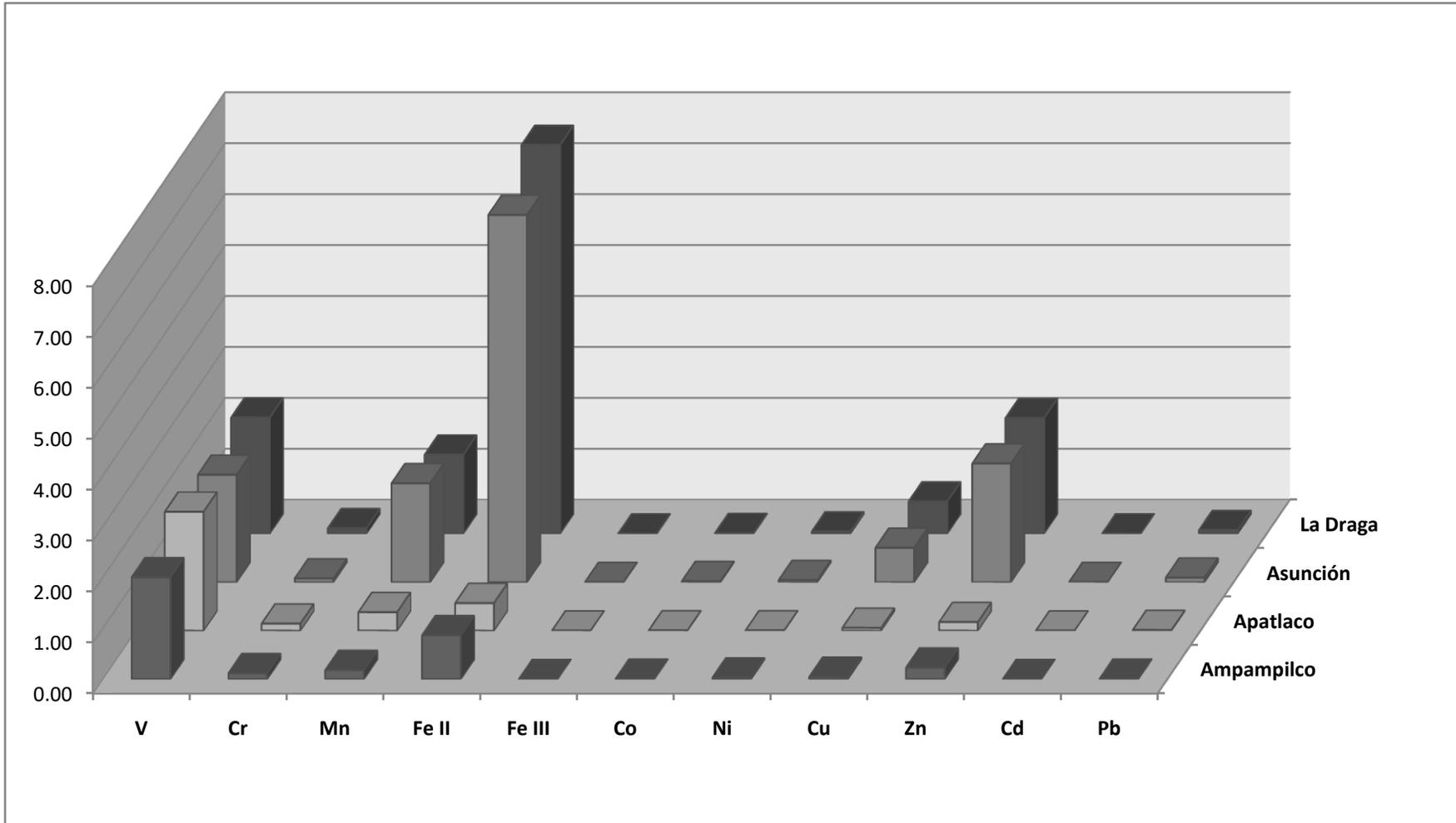


Figura 8.2. Concentración de metales en PS estimado por WHAM.