



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**CALIDAD DEL AGUA Y SUELO EN
EL DISTRITO DE RIEGO 003-
TULA, HIDALGO**

ALEJANDRA FLORES AVALOS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

La presente tesis, titulada: “**Calidad del agua y suelo en el Distrito de Riego 003-Tula, Hidalgo**”, realizada por el alumno: **Alejandra Flores Avalos**, bajo la dirección del Consejero Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

ASESOR:



DR. ARTURO GALVIS SPINOLA

ASESOR:



DR. AGUSTÍN RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México; Junio de 2015

CALIDAD DEL AGUA Y SUELO DEL DISTRITO DE RIEGO 003-TULA, HIDALGO

Alejandra Flores Avalos, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

En la actualidad el manejo de los recursos naturales se vuelve un reto por la demanda de los mismos; el Valle de México viéndose en la necesidad de sacar sus aguas residuales establece una ruta de aguas negras, las cuales se les aprovecha en el área agrícola del Valle del Mezquital. El uso de las aguas residuales para riego pone en discusión que tipo de productos son los que se obtienen con este manejo y cuáles son los problemas que el agua residual provoca al entorno. Por ello, el estudio de la calidad del agua de riego y las condiciones del suelo en el Distrito de Riego 003-Tula se vuelve de importancia, se ha visto el beneficio de las aguas residuales provocando un aumento de producción pero limitando a manejar solo algunos cultivos apropiados. El agua residual se vuelve portadora de nutrientes para los cultivos pero también transporta elementos no esenciales potencialmente tóxicos de los cuales es interesante conocer en qué parte del proceso se quedan, ya que estos mismos pueden quedar de manera inmóvil en el suelo o ser elementos acumulados en la biomasa de los cultivos y provocar deficiencias en su desarrollo o a otros seres vivos. Se realizó un muestreo para agua con 32 muestras, se obtuvieron características como agua alcalina, por los altos contenidos de sales disueltas de cloruro y sodio; es agua dura, con tendencia a crear incrustaciones, situación desfavorable para riego tecnificado. En cuanto a contaminantes, el agua rebasa los límites máximos permisibles para DBO5 y Coliformes fecales. El suelo del Distrito de Riego 003-Tula se muestreo en 35 sitios, haciendo mención que el contenido de materia orgánica es alto, los contenidos de nitrógeno y fosforo Olsen son adecuados para la alfalfa. Los elementos no esenciales potencialmente tóxicos, como el cadmio y cromo rebasaron los límites máximos permisibles para agua; mientras que para el suelo y planta no se presentó como tóxico sin embargo hubo acumulación. El plomo y níquel no se presentaron como tóxicos pero se cuenta con una acumulación en el suelo y la planta.

Palabras clave: calidad del agua, calidad del suelo, elementos no esenciales potencialmente tóxicos, agua residual.

QUALITY OF WATER AND SOIL THE 033-TULA IRRIGATION DISTRICT, HIDALGO

Alejandra Flores Avalos, M.Sc.

Colegio de Postgraduados, 2015

ABSTRACT

Nowadays, the management of natural resources becomes a challenge for the demand for them, the Valley of Mexico seeing itself such necessity discarding the sewage, established the sewage route, which is used in the agricultural area of the Mezquital Valley. The use of waste water for irrigation raises questions about what kind of products are obtained with this management and what are the problems that the sewage causes to the environmental. Therefore the study of the quality of water for irrigation and the soil conditions in the irrigation district 003-Tula becomes important, it has been the benefit of causing waste water an increase in production but limited to handle only some appropriate crops. The sewage becomes a transporter of nutrients for crops but also transports not essential elements potentially toxic of which is interesting to know where in the process were set, it themselves maybe this stationary on the soil or be accumulated elements in biomass crops and cause retarded in their development or to other living beings. The water sampling was conducted with 32 samples, the characteristics of water is alkaline by the high contents of dissolved salts and sodium chloride; it is hard water, tending to create inlays, unfavorable situation for modern irrigation. As for pollution, water exceeds the maximum permissible limits for DBO5 and fecal coliforms. The soil of the irrigation district 003-Tula sampling in 35 sites, it should be noted that the organic matter content is high, the contents of nitrogen and Olsen phosphorus are appropriate for alfalfa. The Potentially toxic not essential elements, such as cadmium and chromium exceeded the maximum permissible limits for water. While for soil and plant not present as the manner toxic it does though exist accumulation. Lead and nickel were not presented as toxic but has an accumulation in the soil and plant.

Keys words: wáter quality, soil quality, potentially toxic not essential elements, waste water.

Agradecimientos

Al Colegio de Postgraduados por haberme brindado la oportunidad de seguir con mi formación académica y personal, mi más sincero agradecimiento y reconocimiento, así como a la planta docente que desempeña un excelente trabajo en el desarrollo de formación de académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT, por el apoyo económico brindado durante mis estudios.

De manera general se agradece a las personas que colaboraron en la elaboración de esta investigación así como al COLMERN, A.C., por su apoyo brindado.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Francisco Gavi Reyes porque no dejó que las palabras se las llevase el viento y fue un excelente brazo de apoyo para poder realizar esta tesis.

A los integrantes de mi Consejo Particular por el apoyo brindado para culminar el proceso de esta investigación:

Dr. Carlos Ramírez Ayala

Dr. Arturo Galvis Spínola

Dr. Agustín Rodríguez González

*Mi madre me conto una historia y justo en ella estuve yo,
Tal vez sin querer pero pude disfrutar de esa historia en carne propia
Ahora podre averiguar que sigue después....*

Contenido

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
IV. JUSTIFICACIÓN.....	5
V. OBJETIVOS	6
VI. MARCO TEÓRICO	7
6. 1. Ubicación geográfica.....	7
6. 2. Particularidades de la conformación del DR 003-Tula	9
6. 3. Marco Físico	9
6.3.1. Clima	9
6.3.2. Suelo	9
6.3.3. Vegetación	12
6.3.4. Recursos hídricos.....	12
6.3.5. Infraestructura hidroagrícola.....	16
6.3.6. Producción agrícola.....	17
6.3.7. Jerarquización de los principales problemas.....	18
6. 4. La contaminación: Conceptos, legislación y normatividad.....	21
6.4.1. La contaminación del suelo y el agua	21
6.4.2. Leyes y normas relacionadas con la contaminación en México.....	24
6. 5. Antecedentes de la calidad del agua en el Valle del Mezquital	28
6.5.1. Calidad del agua en los acuíferos en el Valle del Mezquital	28
6.5.2. Calidad de las aguas superficiales en el Valle del Mezquital	30
6.5.3. Calidad del agua en el Valle del Mezquital de acuerdo con la base de datos de los resultados analíticos de CONAGUA.....	33
6. 6. Antecedentes de la calidad del suelo en el Valle del Mezquital	35
6.6.1. Los suelos del Valle del Mezquital	35
6.6.2. Acumulación de compuestos en los suelos de la región y riesgos de toxicidad.....	36
6.6.3. Efecto residual de los elementos incorporados al suelo a través del riego con agua residual.....	39
6.6.4. Límite de tolerancia del contenido de elementos tóxicos en los suelos	41

6. 7. Antecedentes de la calidad de los cultivos en el Valle del Mezquital	44
6.7.1. La productividad agrícola en el Valle del Mezquital y su relación con el uso del agua residual como fuente de riego	44
6.7.2. La vegetación y los cultivos en el Valle del Mezquital	47
VII. PROCEDIMIENTO.....	53
7. 1. Muestreo y análisis del agua	54
7. 2. Muestreo y análisis del suelo	58
7. 3. Muestreo y análisis del tejido vegetal	62
VIII. RESULTADOS Y ANÁLISIS	65
8. 1. Calidad del agua	65
8.1.1. Calidad química del agua residual para el riego agrícola.....	66
8.1.2. Indicadores de la calidad del agua respecto a su efecto sobre su conducción e infraestructura	75
8.1.3. Contaminantes en las descargas de aguas residuales y su relación con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996	81
8.1.4. Calidad del agua residual	85
8. 2. Calidad del suelo	88
8.2.1. Caracterización física y química del suelo	89
8.2.2. Contenido nutrimental del suelo	100
8.2.3. Elementos no esenciales potencialmente tóxicos	104
8.2.4. Presencia de sales en la solución del suelo	106
8. 3. Contenido de nutrientes y elementos potencialmente tóxicos en el tejido vegetal	109
8.3.1. Concentración macro-nutrientes	110
8.3.2. Concentración de micro-nutrientes.....	114
8.3.3. Concentración de elementos no esenciales potencialmente tóxicos	117
IX. CONCLUSIONES.....	120
X. ANEXO CARTOGRÁFICO	124
XI. BIBLIOGRAFÍA	145

Lista de Cuadros

	Pág.
Cuadro 1 Municipios que integran el DR003-Tula y superficie de riego	8
Cuadro 2 Condiciones de recarga de los acuíferos que se encuentran en el DR003-Tula	13
Cuadro 3 Volúmenes concesionados en el DR003-Tula	15
Cuadro 4 Normas Oficiales publicadas en el Diario Oficial de la Federación en relación a la contaminación del suelo	25
Cuadro 5 Normas empleadas para evaluar la calidad del agua de acuerdo con la base de datos de los resultados analíticos de CONAGUA	33
Cuadro 6 Índices de segundo grado calculados para evaluar el efecto de la calidad del agua su capacidad corrosiva o incrustante sobre las instalaciones en las que se conduce en la zona de estudio.....	57
Cuadro 7 Determinaciones realizadas a las muestras de agua residual para evaluar su calidad con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.....	58
Cuadro 8 Concentración de las especies iónicas (cationes y aniones) analizadas para evaluar la calidad para fines de irrigación en las muestras de agua.....	66
Cuadro 9 Margen de error en la suma de aniones y cationes	69
Cuadro 10 Resultados obtenidos de Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales para las muestras de agua analizadas	72
Cuadro 11 Clasificación del agua de riego en función del valor de RAS.....	74
Cuadro 12 Clasificación del agua de riego en función del CSR.....	74
Cuadro 13 Clasificación de la calidad de las aguas con base en la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y el Carbonato de Sodio Residual (CSR)	74
Cuadro 14 Clasificación del agua de riego en función de los Grados Hidrométricos Franceses.....	76
Cuadro 15 Dureza del agua calculada con varios criterios: Dureza por CaCO ₃ ; Dureza por grados hidrométricos franceses; Alcalinidad	76
Cuadro 16 Nivel de alcalinidad.....	77
Cuadro 17 Índice de saturación y su clasificación	79
Cuadro 18 Índice de Puckorius y su clasificación	79
Cuadro 19 Índice de Larson y su clasificación	80
Cuadro 20 Índice de corrosión o incrustación de las sales del agua de riego calculado con varios criterios: IL=Langelier simplificado; RSI=índice de Ryznar; LSI=índice de saturación; PSI=índice de Puckorius; LAI=índice de Larson-Skold	80
Cuadro 21 Contaminantes que rebasaron los Límites Máximos Permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996	81
Cuadro 22 Contaminantes básicos bajo la interpretación de la NOM-001-SEMARNAT-1996	82
Cuadro 23 Metales pesados y cianuro bajo la interpretación de la NOM-001-SEMARNAT-1996.....	82
Cuadro 24 Contaminantes básicos, metales pesados y cianuro	84
Cuadro 25 Clasificación del agua para riego según Ayers y Wescott, 1987.....	85
Cuadro 26 Determinación de la calidad del agua para riego por Ayers y Wescott (1987).....	85

Cuadro 27 Clasificación del agua para riego según Richards, 1954	86
Cuadro 28 Interpretación de los resultados del agua residual, de acuerdo a la clasificación de Richards (1954)	87
Cuadro 29 Resultados obtenidos de acuerdo a las muestras de suelo analizadas	90
Cuadro 30 Clase textural de las muestras de suelo analizadas	92
Cuadro 31 Relación general entre densidad aparente del suelo y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo	93
Cuadro 32 Relación de Densidad aparente y Textura	93
Cuadro 33 Clasificación de conductividad eléctrica según la NOM-021-SEMARNAT-2000	95
Cuadro 34 Clasificación del suelo en cuanto a pH según la NOM-021-SEMARNAT-2000	96
Cuadro 35 Clasificación de materia orgánica según la NOM-021-SEMARNAT-2000	97
Cuadro 36 Variables empleadas para la caracterización del suelo	98
Cuadro 37 Contenido nutrimental del suelo (Nitrógeno inorgánico, Fósforo Olsen, Hierro, Manganeso, Zinc, Cobre).....	100
Cuadro 38 Clasificación de Nitrógeno inorgánico según la NOM-021-SEMARNAT-2000.....	101
Cuadro 39 Interpretación de los resultados obtenidos para los iones de nitrógeno y fósforo Olsen	101
Cuadro 40 Interpretación de los resultados obtenidos para Hierro, Manganeso, Zinc y Cobre.....	102
Cuadro 41 Concentraciones de los nutrientes en el suelo y su interpretación gráfica.....	102
Cuadro 42 Contenido nutrimental del suelo y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000	103
Cuadro 43 Valores sugeridos de elementos tóxicos en el suelo según la tolerancia de los cultivos NOM-021-SEMARNAT-2000	104
Cuadro 44 Concentraciones de referencia total por tipo de uso de suelo agrícola NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004	104
Cuadro 45 Elementos no esenciales potencialmente tóxicos	105
Cuadro 46 Contenido de elementos potencialmente tóxicos por muestra de suelo	105
Cuadro 47 Contenido de sales en la solución del suelo	108
Cuadro 48 Concentración de macro-nutrientes en el tejido vegetal	110
Cuadro 49 Macro-nutrientes y su rango de concentraciones fito-tóxicas obtenidas para lo muestreado	111
Cuadro 50 Micro-nutrientes y su rango de concentraciones fito-toxicas obtenidas para lo muestreado	115
Cuadro 51 Concentración de micro-nutrientes en el tejido vegetal.....	115
Cuadro 52 Concentración de elementos no esenciales potencialmente tóxicos	117
Cuadro 53 Elementos potencialmente tóxicos y su rango de concentraciones fito-tóxicas obtenidas para lo muestreado	119

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Ubicación del Distrito de Riego 003-Tula.....	7
Figura 2 Acuíferos del DR003-Tula.....	14
Figura 3 . Basura acumulada en los canales de conducción del agua residual.....	18
Figura 4 Aspecto de compuertas y conducción del agua residual.....	19
Figura 5 Canales revestidos para la conducción del agua residual.....	20
Figura 6 Canales de tierra para la conducción del agua residual.....	20
Figura 7 Aspecto habitual de la tierra de cultivo después del riego.....	21
Figura 8 Temas de las iniciativas publicadas en el Diario Oficial de la Federación en Normas Oficiales, Proyectos de Normas, modificaciones a las mismas, avisos, entre otros de 1955 a 2013 (BIO=biosólidos; RGO=riego; SUE=suelos; ARE=agua residual; RPE=residuos peligrosos; CON=contaminación).	25
Figura 9 Calificación de la calidad del agua con base en la norma del Water Quality Index de los Estados Unidos, para cada sitio de monitoreo de la CONAGUA en el Valle del Mezquital.	34
Figura 10 Ubicación del Muestreo de Agua.....	55
Figura 11 Ubicación de Muestreo de Suelo.....	60
Figura 12 Ubicación de Muestreo de Planta.....	63
Figura 13 Ubicación de los sitios de muestro de agua dentro del DR003-Tula.....	65
Figura 14 Tendencia de la relación cuantitativa entre la sumatoria de aniones y la sumatoria de cationes.....	68
Figura 15 Tendencia de la relación cuantitativa entre la conductividad eléctrica y la sumatoria de cationes.....	70
Figura 16 Distribución de los valores de conductividad eléctrica (CE), temperatura del agua (T), pH, y sólidos disueltos totales (SDT) del muestreo de agua.....	71
Figura 17 Tendencia de la relación cuantitativa entre la conductividad eléctrica y el total de sólidos disueltos.....	72
Figura 18 Ubicación de los sitios de muestreo de suelo dentro del DR003-Tula.....	89
Figura 19 Triangulo textural del suelo mostrando los porcentajes de arcilla, limo y arena de las clases texturales.....	91
Figura 20 Distribución espacial en el DR003-Tula de la textura del suelo.....	92
Figura 21 Distribución espacial de las constantes hídricas.....	95
Figura 22 Distribución geoespacial de los Macro-nutrientes Primarios.....	113
Figura 23 Distribución geoespacial de los Macro-nutrientes Secundarios.....	114

Anexo Cartográfico

Características del Agua

- A.1 Temperatura
- A.2 pH
- A.3 Conductividad Eléctrica
- A.4 Sólidos disueltos totales
- A.5 DBO5
- A.6 Coliformes fecales

Características del Suelo

- A.7 Textura
- A.8 pH
- A.9 Conductividad Eléctrica
- A.10 Densidad aparente
- A.11 Materia orgánica
- A.12 Constantes Hídricas
- A.13 Nutrientes en Tejido vegetal

Elementos no esenciales potencialmente tóxicos

- A.14 Arsénico
- A.15 Cadmio
- A.16 Cromo
- A.17 Níquel
- A.18 Plomo

I. Introducción

El Valle de México forma una cuenca endorreica por lo que la evaporación es la única salida natural del agua que ahí se acumula. Por tal motivo, desde la llegada de los españoles en el siglo XVI se trató de desaguar la región a través de diversos procedimientos y no fue sino hasta finales del siglo XIX que se logró este cometido cuya ruta principal conduce hacia el Valle del Mezquital, situación que prevalece hasta hoy en día.

En el Valle del Mezquital se ha usado como fuente de riego el agua residual proveniente del desagüe del Valle de México desde el inicio del siglo XX hasta la actualidad, lo que ha conllevado a tener efectos positivos sobre la productividad agrícola incluso sin tener que aplicar fertilizantes o mejoradores del suelo.

Las aguas residuales aportan elementos químicos y biológicos tóxicos con implicaciones de diverso tipo en el ámbito ecológico, social, económico, político, académico, entre otros. Entre las medidas implementadas para mejorar las condiciones de vida y el entorno de la región, está la planta de tratamiento de aguas residuales "Atotonilco", la cual se espera induzca cambios positivos en todos los sentidos; y las actividades agrícolas en el Distrito de Riego 003-Tula no serán la excepción, por lo que desde el punto de vista técnico agronómico es indispensable evaluar antes de la puesta en marcha de la PTAR los siguientes aspectos: la variación de la concentración actual de elementos potencialmente tóxicos y nutrientes en el agua empleada como fuente de riego; y la acumulación de nutrientes y elementos potencialmente tóxicos en el suelo y la planta.

II. Antecedentes

El Distrito de Riego 003-Tula se crea para aminorar las condiciones de clima seco con lluvias en verano (400mm a 500mm anual) y la incertidumbre del temporal en la zona que afectaban la actividad agrícola. Siendo este Distrito de Riego uno de los más grandes del mundo en cuanto al uso de aguas negras sin tratar como fuente de riego, las cuales provienen del desagüe de la Ciudad de México y su área conurbada. De esta manera fue factible la producción de alimentos en las partes planas de los valles de la región; sin embargo, el estiaje aún es un factor decisivo porque origina mayor demanda de agua y consecuentemente escasez en el riego (Rodarte *et al.*, 2012).

De acuerdo con los planteamientos, de Rodarte, *et al.*, 2011, el riego con aguas residuales crea un espejismo rural que hace parecer a la región como si fuese húmeda y siempre verde, por lo que plantea la necesidad de una reorganización económica para acelerar la restauración ambiental, rescatar la cultura rural e incentivar la conciencia ambiental en sitios secos y abandonados. Un obstáculo a su propuesta es la falta de interés de los mismos pobladores que no efectúan trabajos sin que haya una retribución económica de por medio. De hecho, según este mismo autor, los habitantes del Valle del Mezquital no perciben la carencia de agua porque la mayoría de las comunidades cuentan con un servicio regular.

El río Tula conduce las aguas negras y las distribuye a todos los valles intermontanos de la región a través de decenas de canales por las diferencias de altitud. Esto se debe a que la Cuenca del Valle de México está a 2,200 msnm y el Mezquital entre 2,000 msnm (al sur) y 1,700 msnm (al norte). El río Actopan inicia en la serranía de Pachuca a 2,950 msnm en el que se le unen los cauces de arroyos hasta llegar al río Tula en Ixmiquilpan, tributario del río San Juan en la parte alta del Pánuco. Las condiciones propicias para el riego crean dos realidades: zonas planas y semi-planas con sistemas agrícolas muy productivos; áreas con pendientes abruptas que imposibilita el riego y que además cuenta con suelos improductivos. Con base en lo anterior Benítez (1971), menciona que existe el mezquital irrigado, el desierto y la montaña del mezquital.

Al llegar los españoles al Valle del Mezquital con el ganado se produjo cambios en el uso del suelo, lo cual llevaron a cabo con base en las concesiones virreinales de tierras, por ejemplo: del año 1535 al 1610 se fundaron 47 ranchos ovejeros. Para limitar el daño a los campos agrícolas, el virrey no permitió el establecimiento de ranchos con grandes hatos en el Valle del Mezquital ni en sitios con altitudes superiores a los 2200 msnm y 5% de pendiente (Hunter, 2014).

Con lo anterior, el valle del Mezquital que fue un área verde de agricultura intensiva se convirtió irreversiblemente en una región árida de pastos y matorrales apta sólo para el pastoreo extensivo.

Los agentes y procesos de la transformación ambiental a inicios de la Colonia en el Valle del Mezquital han sido motivo de estudio por diversos investigadores a través de diferentes técnicas geomorfológicas, palinológicas, paleolimnológicas y por fuentes documentales históricas. En el siglo XVI se producía maíz, calabazas, algodón y cacao porque había un clima tropical (Gil, 2009).

Al final de la Época Colonial los alcaldes de los ayuntamientos eran responsables de controlar el agua y en la transición del país como nación independiente dichos ayuntamientos se aglutinaron en municipios. El abasto hídrico durante los primeros años de la Colonia se caracterizó por una combinación de tecnología hidráulica mesoamericana con aportes europeos, originando un proceso de innovación, continuidad y desplazamiento de los métodos anteriores (Rojas *et al.*, 2009). La diferencia estaba en la fuente de energía, puesto que los pobladores prehispánicos se apoyaban en el trabajo humano políticamente organizado y los españoles empleaban la energía de animales domesticados, el viento y el agua misma para mover máquinas giratorias.

Un nuevo cambio se dio hasta llegar la segunda mitad del siglo XIX a raíz del conocimiento del efecto de las aguas contaminadas sobre la salud pública y fue hasta entonces en que se le dio atención a la calidad del agua (Pérez, 1988). Esta situación ocasionó que por primera vez se estableciera como política pública la participación de empresas privadas en extracción y abasto del agua.

III. Planteamiento del problema

El uso de aguas residuales como fuente de riego para la agricultura en el Valle del Mezquital confluye hacia una serie de situaciones paradójicas, entre las que resaltan dos de ellas: *primero* se trata de una región con escasa pluviometría que da la apariencia de ser húmeda con vegetación exuberante en los valles, contrastando con la aridez en las montañas que los rodean; y *segundo* las aguas con las que se irrigan las zonas de cultivo aún no están tratadas, por lo que contienen diversos contaminantes químicos y biológicos de origen urbano, doméstico e industrial y a pesar de ello, dicha forma de irrigar ha sido un importante detonador de su productividad agrícola.

Ante esta situación, surgen interrogantes sobre la presencia de elementos tóxicos en suelos y cultivos en el Distrito de Riego 003-Tula, del Valle del Mezquital, como consecuencia del uso continuo del agua negra cruda, lo que a su vez implica una problemática en diferentes ámbitos entre los que destacan el social, económico, político, ecológico, tecnológico y académico. Para entender y explicar lo anterior es necesario conocer: el origen que dio lugar a las causas de la llegada del agua residual al Valle, su posterior empleo como fuente de riego y sus consecuencias hasta llegar a la condición actual.

IV. Justificación

El drenaje proveniente de la Cuenca del Valle de México entró paulatinamente al Valle del Mezquital y se aprovechó como fuente de riego, por lo que los terrenos que se vieron beneficiados mejoraron su productividad agrícola desde un inicio; sin embargo, no se atendieron los efectos secundarios que esta práctica sobre la salud de los pobladores, la inocuidad de los productos y condiciones ambientales de la región. De hecho, los inicios de la normatividad internacional respecto a estos temas data desde hace cinco o seis décadas y en México entre 20 y 25 años.

En el transcurso de la historia hídrica reciente de la región (aproximadamente 120 años), el agua negra ha variado significativamente en calidad (nutrientes, materia orgánica, tóxicos) y cantidad; asimismo a aumentado la superficie irrigada con dicha agua. Además, el medio edáfico posee propiedades y características contrastantes, con tiempos de residencia variable de los diversos elementos químicos y orgánicos, creando un vasto mosaico de condiciones que se reflejan en las aparentes divergencias y contradicciones de los distintos estudios académicos que se han realizado en el Valle del Mezquital. Al respecto, la próxima puesta en marcha de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco se agrega como un factor adicional para la variabilidad temporal y espacial de los terrenos agrícolas, razón por la cual es indispensable conocer la condición actual de los suelos, plantas y aguas en los distritos de riego de la región que es motivo del presente estudio, además de prever los distintos escenarios que se pudiesen dar.

V. Objetivos

- Determinar la calidad del agua de riego y cuantificar la concentración de elementos potencialmente tóxicos de cada sitio seleccionado del Distrito de Riego 003-Tula, Hidalgo.
- Cuantificar la concentración de nutrientes, nitrógeno inorgánico (amonio y nitrato), fosforo Olsen, hierro, magnesio, zinc y cobre; y elementos no esenciales potencialmente tóxicos, cadmio, plomo, níquel, cromo y arsénico, así como la presencia de sales, en los suelos agrícolas de cada sitio seleccionado del Distrito de Riego 003-Tula, Hidalgo.
- Cuantificar el contenido de macro-nutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre; micro-nutrientes: hierro, cobre, manganeso, zinc y boro; y elementos no esenciales potencialmente tóxicos, nitrógeno en forma de nitratos, sodio, arsénico, cadmio, plomo, cromo y níquel; en el tejido vegetal de cada sitio seleccionado del Distrito de Riego 003-Tula.

VI. Marco Teórico

6. 1. Ubicación geográfica

El Valle del Mezquital se encuentra en su mayor parte en el estado de Hidalgo y el resto en los municipios de Apaxco, Tequixquiac y Huehuetoca, estado de México. En realidad dicho valle consiste en un conjunto de valles rodeados por montañas en cuya vegetación cerril destaca el mezquite. Sus cinco regiones más representativas son Actopan, Ixmiquilpan, Tasquillo, Tula de Allende y Alfajayucan.

El Distrito de Riego 003-Tula (DR003-Tula) se localiza en la parte suroeste del Estado de Hidalgo, entre los paralelos $19^{\circ} 40'$ y $20^{\circ} 29'$ de latitud norte y los meridianos $98^{\circ} 57'$ y $99^{\circ} 21'$ de longitud oeste, su altitud media es de 1,895msnm, cubre la región conocida como Valle del Mezquital al Centro–Suroeste del Estado de Hidalgo. La utilización de las aguas residuales con fines agrícolas, data de fines del siglo pasado, se puede decir que el empleo de esta agua es una consecuencia espontánea de la necesidad de producir bienes agrícolas, no prevista ni planificada de las obras de desagüe del Valle de México. En la Figura 1 se presenta la localización del DR003-Tula.



Figura 1 Ubicación del Distrito de Riego 003-Tula

Para controlar el Río Tula, a finales del Porfiriato se inicia la construcción de la primera presa Taxhimay, aunque se concluyó en 1912 y fue sobre-elevada durante 1933 y 1934. La segunda presa de nombre Requena, fue construida en 1919-1922 y sobre-elevada en 1926, bajo la supervisión de la Comisión Nacional de Irrigación. La tercera presa que lleva el nombre de Endho fue construida por la antigua Secretaria de Recursos Hidráulicos entre 1947 y 1951.

La última obra de importancia para controlar los excedentes de la cuenca de México es el Emisor Central, cuya construcción se inició en 1975 para conducir aguas residuales del Interceptor Central y del Emisor Oriente, desembocando cerca de la cortina de la Presa Requena y representa el esfuerzo más reciente para evacuar las aguas del Valle de México aprovechando la gravedad.

El DR003-Tula cuenta con una superficie dominada de 50,173.63ha (Cuadro 1), distribuidas en 17 municipios; de las cuales 49,600ha; son las regables, el número de usuarios es de 33,183.

Cuadro 1 Municipios que integran el DR003-Tula y superficie de riego

Municipio	Superficie (ha)
Actopan	2,405.81
El Arenal	220.06
Ixmiquilpan	412.76
San Salvador	6,136.45
Fco. I. Madero	7,149.85
Santiago de Anaya	3,083.57
Mixquiahuala	7,999.26
Progreso	2,526.75
Chilcuaula	98.83
Atitalaquia	1,430.71
Atotonilco de Tula	320.97
Tepetitlán	963.08
Tetepango	963.56
Tezontepec	6,812.62
Tlahuelilpan	1,372.71
Tlaxcoapan	3,511.31
Tula	4,765.34
Total	50,173.63

6. 2. Particularidades de la conformación del DR 003-Tula

El DR003-Tula se crea por acuerdo Presidencial el 20 de enero de 1955, posteriormente a los primeros riegos con aguas residuales que datan de 1896.

Durante los años de 1906 a 1907, la compañía de Luz y Fuerza de Pachuca para aprovechar dichas aguas, construyó dos estaciones para la generación de energía eléctrica, uno en Juandho y otro en Cañada, dando origen al Sistema Tlamaco-Juandho.

Los módulos de riego que forman el DR003-Tula son: Módulo 1 Actopan, Módulo 2 Dendho-Cardonal, Módulo 4 Endho-Xochitlán, Módulo 5 Tepatepec, Módulo 6 Alto Tepatepec, Módulo 7 Cerro del Xicuco y Módulo 9 Sección 45, Tlamaco-Juandho, Mixquiahuala y Tula.

6. 3. Marco Físico

6.3.1. *Clima*

En el Valle del Mezquital (Ixmiquilpan) la temperatura ha llegado a -9°C a principios de año y a 38°C a la sombra en el mes de mayo. Mientras en Mixquiahuala se han registrado temperaturas extremas de 39.5°C en verano, y en Huichapan el termómetro ha indicado -10°C en invierno. Esta diferencia se debe a que el Valle del Mezquital está a 2000 m de altitud, lejos de toda protección natural contra los cambios de clima.

En el DR003-Tula ay tres tipos de climas, predominando el clima templado semiseco BS1 Kw. En la porción Norte y Centro, en una pequeña zona hacia la parte Norte, específicamente en la ciudad de Ixmiquilpan, se tiene un clima semicálido y semiárido del tipo BSohw, en la porción Sur y Oriente el clima es templado subhúmedo del tipo C (wo), teniendo pequeñas variaciones en cuanto a humedad.

6.3.2. *Suelo*

El Valle del Mezquital se ubica en una amplia depresión rodeada por cadenas montañosas de poca altura que propician un clima seco y por ende, una escasa evolución de sus suelos. Los suelos de la región provienen de dos principales eventos; una surge de la formación calcárea del Cretácico que cubre alrededor de 60% del Valle del

Mezquital (Silva-Mora, 1997); en el sector este-sureste y la otra de rocas ígneas del Terciario inferior, localizadas al oeste. La constante son los suelos delgados por la erosión recurrente por varios siglos, por lo que es frecuente observar suelos compuestos de calizas con escaso contenido de nutrientes y materiales orgánicos (Torres, 2001).

Las características de los tipos de suelos que se presentan en el DR003-Tula en función de la profundidad son:

Suelos profundos, espesor mayor a 200 cm, color superficial de gris a pardo oscuro, textura franco arcillosa y franco-arenosa, poca pedregosidad en el perfil y en la superficie; presentan erosión hídrica en forma de pequeños surcos de grado moderado.

Suelos poco profundos, espesor promedio 45 cm, color pardo muy claro, de textura franco arcillo-arenosa, presenta erosión hídrica de forma laminar y grado incipiente, con estructura granular en la superficie.

Suelos someros, espesor entre 25 y 30 cm, color gris oscuro de textura franco, existe erosión hídrica formando pequeños surcos; tepetate (toba volcánica) a 30 cm de profundidad.

Suelos medianamente profundos, profundidad de 60 a 95 cm, de color gris pardo, gris oscuro y pardo amarillo oscuro, textura franco arcillosa y arcillosa; estructura granular en la primera capa.

Respecto a la distribución por estrato, en el área del DR003-Tula se han formado dos agrupamientos. El primero corresponde a suelos recientes, aluviales, profundos, de texturas variables y topografía plana. El segundo a suelos *in situ* y mixtos con grado de desarrollo variable.

En el *primer* agrupamiento existen 2 series: Actopan y Lagunillas, que son suelos profundos. En el *segundo* se encuentran las series: Tepatepec y Progreso que son las que ocupan mayor superficie. La descripción detallada de estas series es la siguiente:

Serie Actopan: Los suelos de esta serie se localizan en las vegas de los arroyos y ríos de la región; son profundos (200 cm); las texturas dominantes son gruesas; son originados por diversos materiales transportados por las corrientes en los que dominan las tobas y andesitas; su modo de formación es aluvial con insipiente grado de desarrollo;

la topografía es plana con pendiente igual o menor al 2%; el drenaje superficial es moderadamente deficiente; el drenaje interno es rápido dadas las texturas arenosas que predominan en el perfil.

Serie Lagunillas: La serie de estos suelos se localiza en las márgenes de los ríos que cruzan la región; son profundos; de topografía plana con pendiente menor de 2%, originados por materiales diversos arrastrados por las corrientes, entre los que predominan las andesitas y riolitas; su formación es aluvial con desarrollo incipiente; el drenaje interno se considera deficiente en virtud de dominar en el perfil las texturas finas, sufren inundaciones periódicas por los desbordamientos de los ríos o escurrimientos de las partes altas adyacentes; el nivel freático se localiza aproximadamente a un metro de profundidad; el tipo dominante es la arcilla; su clasificación agrícola es de segunda clase por drenaje y/o inundación.

Serie Tepatepec: Son suelos de profundidad que varía de 50 a 150 cm texturas medias y finas; coloración gris amarillo pardo; topografía sensiblemente plana o inclinada de lomeríos originados de tobas; modo de formación aluvial; por su grado de desarrollo se consideran medianamente intemperizados; descansan sobre una toba compacta sin llegar a ser cementada, en la cual se encuentran concreciones calcáreas acumuladas en forma de capas o bien acumuladas amorfas; su fertilidad es baja en lo que respecta a nitrógeno, fósforo y potasio; abundante contenido de calcio, no representan problemas de sales; su pH es ligeramente alcalino.

Serie Progreso: Los suelos de esta serie se localizan en las lomas y cerros; generalmente son de poco espesor; yacen sobre un material calizo que dificulta la penetración de raíces y el paso del agua; la topografía es inclinada y fuertemente inclinada; las texturas predominantes del perfil son medias y finas, encontrándose texturas franco arenosas, con coloraciones que varían de café claro y oscuro al café rojizo claro; ocasionalmente se presentan cantos rodados en la superficie; cuando el material calizo está a pocos centímetros de la superficie, es triturado por el arado y se incorpora al suelo; estos suelos son originados de una capa caliza consolidada y su modo de formación es *in situ* en las partes altas y coluviales en las laderas.

6.3.3. Vegetación

El estado de Hidalgo se divide en 10 regiones geográficas y culturales, de las cuales el Valle del Mezquital es una de ellas; por su topografía también incluye los municipios mexiquenses de Apaxco, Tequixquiac y Huehuetoca, que siguen la ruta del desagüe del Valle de México hasta el Río Tula (Rodarte *et al.*, 2012). La región está formada por valles intermontanos, en las partes altas abundan pastos y arbustos como vegetación secundaria (antes del siglo XVI predominaban los bosques de encino), en las partes medias y pies de monte hay matorral xerófilo con agaves, cactáceas, yucas y mezquites, mientras que en las partes bajas prácticamente ya no existe la vegetación natural, las cuales son planicies lacustres y riberas con microclimas cálidos secos sin corrientes perennes de aguas superficiales, por lo que antes de la instalación de la red hidráulica (agua entubada) fue fundamental la construcción de jagüeyes y pozos artesanales, así como el aprovechamiento de los manantiales.

La vegetación es característica de las zonas semiáridas, formada principalmente por matorral xerófilo, pastizal y bosque espinoso con vegetación. Las especies predominantes son las siguientes: *Acacia spp* (Huisache), *Opuntia spp* (Nopal), *Pachycereus* (Cardón), *Myrtillocactus Geometrizzans* (Garambullo), *Agave spp* (Maguey), *Prosopis Laeuigata* y *P. spp* (Mezquite), *Fraxinus Unhei* (Fresno), *Populis Fremanti* (Álamo), *Salix spp* (Sauce), y otros, así como pastos de los géneros, *Arístida Andropogon*, *Boutelova*, *Cenchrus* y *Cynodon*.

6.3.4. Recursos hídricos

El DR003-Tula se localiza en la Región Hidrológica Administrativa No. 13 Aguas del Valle de México, forma parte de la Cuenca del Río Moctezuma en la región del Pánuco, su principal abastecimiento de agua proviene de las aguas residuales del Valle de México, las cuales se drenan de manera artificial a través de dos túneles, El Tajo y el Emisor Central. El área de estudio, queda comprendida en la cuenca del Río Tula incluye la cuenca del Valle de México así como las cuencas de los ríos Tula, El Salto y Salado; colinda al Norte con la Cuenca del Bajo Pánuco, al Sur con la Cuenca del Valle de México, Cuenca del Río Lerma, al Poniente con la Subcuenca del Río San Juan Del Río y al Noreste con la Subcuenca del Río Amajac y con la subcuenca de la laguna Meztitlán.

Las fuentes de abastecimiento para riego del Distrito las constituyen las aguas residuales de la zona metropolitana del Valle de México, que se aprovechan mediante el Emisor Central, Río el Salto y el Río Salado; una parte del volumen que llega por el Emisor Central, es regulada mediante la presa de almacenamiento Endho. También se aprovechan las aguas de la cuenca del Río Tula y sus afluentes que son reguladas mediante las presas de almacenamiento Taxhimay, Requena y Endho. Adicionalmente se cuenta con las aguas de retorno mediante el Dren Tepa Lagunilla y pozos profundos oficiales para utilizarlos sólo en caso de escasez de agua de gravedad en el Módulo Actopan.

En el DR003-Tula se encuentran cuatro *Acuíferos*: Ixmiquilpan, Actopan-Santiago de Anaya, Ajacuba y Valle del Mezquital.

Los resultados consignados en el Cuadro 2 corresponden a las condiciones de recarga determinadas con base en los estudios técnicos y a los volúmenes de agua subterránea inscritos al 30 de abril del año 2002 en el Registro Público de Derechos de Agua.

Cuadro 2 Condiciones de recarga de los acuíferos que se encuentran en el DR003-Tula

Clave	Unidad Hidrogeológica (Acuífero)	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
Cifras en Millones de metros cúbicos anuales							
1310	Valle del Mezquital	672.70	500.00	157.38	203.4	15.32	0.00
1312	Ixmiquilpan	78.00	57.00	0.33	18.2	20.67	0.00
1313	Actopan-Santiago de Anaya	271.50	247.20	29.79	26.5	0.00	-5.50

R: Recarga Media Anual; **DNCOM:** Descarga Natural Comprometida; **VCAS:** Volumen Concesionado de Agua Subterránea; **VEXTET:** Volumen de Extracción Consignado en Estudios Técnicos; **DAS:** Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea.

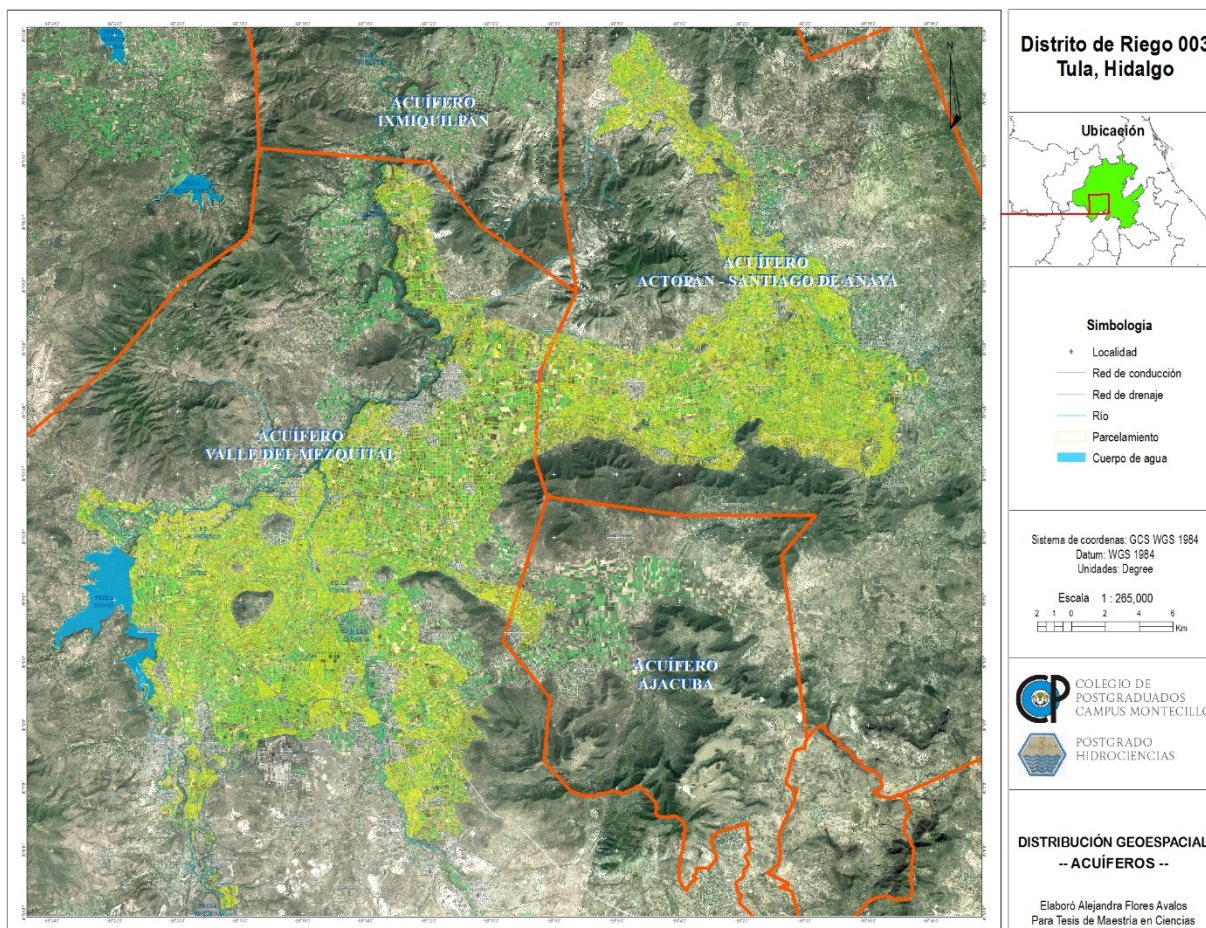


Figura 2 Acuíferos del DR003-Tula

En lo referente a los eventos de sequía, cada año se presenta el problema de abasto de agua para riego. Normalmente es en los meses de abril, mayo y junio, en donde se llega al extremo de perderse algunas veces un 2% de las cosechas (año de 1998); en este periodo se hacen determinadas prácticas operativas para evitar al máximo las pérdidas; dentro de estas está el de prolongar más de lo normal los intervalos de riego a las alfalfas y hacer tandeos entre diferentes zonas de riego, entre otras.

Para el caso de eventos de inundación, se mantiene en monitoreo los desfogues de la presa Requena en época de lluvias, debido a la llegada atípica de volúmenes de agua por el emisor central, para así evitar problemas de inundaciones en ciertos puntos poblacionales los municipios no han respetado el derecho de servidumbre de la zona federal de las presas que se encuentran en las riberas del río Tula. Estos eventos se han

presentado en las cabeceras municipales de Tula e Ixmiquilpan por no contar con capacidad de conducción.

Volúmenes autorizados

Volumen concesionado. En el caso del DR003-Tula, los volúmenes los autoriza el Comité Técnico de Operación y Obras Hidráulicas del Valle de México.

La Gerencia Técnica de la Comisión Nacional del Agua, realizó un análisis para la asignación de volúmenes de aguas residuales requeridas para los Módulos del DR003-Tula. Estos volúmenes concesionados en las unidades y módulos pertenecientes al distrito de riego son los siguientes:

Cuadro 3 Volúmenes concesionados en el DR003-Tula

Unidad/módulo		Superficie (ha)	Nivel fuente de Abastecimiento		Eficiencia red mayor (%)	Nivel punto de control Módulo/Unidad	
			Volumen (Mm ³)	Lam. (cm)		Volumen (Mm ³)	Lam. (cm)
M1	ACTOPAN	10,227.17	187.54	183	83.9	157.29	154
M2.1	DENDHO-CARDONAL	306.00	6.02	197	82.5	4.97	162
M4	ENDHO-XOCHITLAN	3,833.13	75.45	197	82.5	62.25	162
M5	TEPATEPEC	5,841.19	114.98	197	82.5	94.86	162
M6	ALTO TEPATEPEC	1,467.58	8.89	61	82.5	7.34	50
M 7.1	CERRO DEL XICUCO	1,000.30	19.69	197	82.5	16.24	162
U2	TLAMACO-JUANDHO	9,146.44	180.04	197	82.5	148.53	162
U3	MIXQUIAHUALA	6,215.92	122.35	197	82.5	100.94	162
U7	TULA	9,645.90	189.87	197	82.5	156.64	162
	TUMBA	2,490.00	34.71	139	82.5	28.64	115
	TOTAL	50,173.63	939.55	200	82.8	777.70	

Fuente: CNA. Gerencia Técnica.

Volumen sustentable. Con base en el registro anual de régimen del almacenamiento de la presa Endho, la Gerencia Técnica de la Comisión Nacional del Agua, determinó que el volumen sustentable para los módulos de riego del DR003-Tula, es de **368.30** Mm³ (Millones de metros cúbicos).

Los gobiernos del Distrito Federal y del Estado de México, tienen un programa de tratamiento y reutilización de aguas residuales tratadas para actividades que no requieren agua blanca de primer uso como el agua para servicios, uso industrial y para el riego de parques y jardines. Asimismo, el agua blanca de las Presa Taxhimay y Requena es una

fuentes potenciales para uso de agua potable en el Valle del Mezquital, con lo que el volumen disponible de agua para riego disminuiría.

6.3.5. *Infraestructura hidroagrícola*

La *presa Endho* se terminó de construir en el año 1951 con el propósito de utilizar el agua almacenada para riego. Está ubicada cerca de la localidad Gral. Pedro Ma. Anaya, a 12 km aproximadamente hacia el norte de la ciudad de Tula, Hidalgo. Recibe aportaciones del Río Tula y del canal Dendho el mismo que es alimentado por derivaciones hechas al río Salado. Tiene una capacidad útil de 122.9 Mm³, con una obra de toma con capacidad para derivar un gasto 25 m³/s hacia el canal principal Endho mediante el cual se riegan los módulos Alto Tepatepec, Endho-Xochitlán y parte de los módulos Actopan y Tepatepec así como parte de la Unidad de Riego de Tula.

La *presa Requena* se terminó de construir en el año 1926 con el propósito de controlar las avenidas en el río Tepeji y utilizar el volumen almacenado para riego. Se encuentra ubicada cerca de la ciudad de Tepeji del Río, su cortina se encuentra a 7 km aproximadamente hacia el noroeste de la ciudad. Recibe aportaciones del río Tula y del río El Salto. Tiene una capacidad útil de 52.5 Mm³, con una obra de toma con capacidad para derivar un gasto de 15 m³/s hacia el canal principal Requena mediante el cual se riegan parte de los módulos Actopan y Tepatepec así como parte de las unidades de riego de Tula y Mixquiahuala.

La *presa Taxhimay* se terminó de construir en el año 1912 con el propósito de utilizar el agua almacenada para riego. En el año de 1934 fue sobre elevada para aumentar su capacidad de almacenamiento. Se encuentra ubicada en el municipio de Villa del Carbón, estado de México; su cortina se encuentra a 8 km aproximadamente hacia el suroeste de la ciudad de Tepeji del Río. Recibe aportaciones del Río Tula y se emplea como transvase de la presa Requena. Tiene una capacidad útil de 42.8 Mm³, con una obra de toma con capacidad para derivar un gasto de 14 m³/s hacia el río Tepeji que es captado en el vaso de la presa Requena.

En el DR003-Tula, se encuentran seis presas derivadoras principales: El Refugio, Tlamaco-Juandho, El Tablón, La Virgen, La Licuadora, y Juandho.

Se construyeron 16 pozos profundos para auxiliar la parte final del módulo de riego Actopan. Estos se pondrán a trabajar en los meses con máxima demanda de agua. Su capacidad instalada es de 0.925 m³/s; se espera obtener un volumen medio anual de 10.54 Mm³.

Existen dentro del DR003-Tula 4 plantas de bombeo:

- El bombeo llamado *Bombeo Dendho-Cardonal* riega el Módulo 2 ubicado en el municipio de Atitalaquia.
- En el Módulo de Riego 6 que se ubica en los municipios de Mixquiahuala, Progreso, Francisco I. Madero y San Salvador tiene una planta de *bombeo Alto Tepatepec* utilizada para el riego.
- El Módulo de Riego 7-1 que se ubica en el municipio de Tezontepec de Aldama tiene una planta de *Bombeo Cerro del Xicuco* y un rebombeo.
- El Módulo de riego No. 8 que se ubica en los municipios de Atotonilco de Tula, Atitalaquia, Tlaxcoapan y Tlahuelilpan cuenta con un bombeo el Artículo 27 Constitucional.

La red de conducción (tramo muerto y red mayor) del DR003-Tula tiene una longitud de 318.12 km. La red de distribución o red menor de canales tiene una longitud total de 439.58 km, de los cuales 368.23 km se encuentran revestidos.

En el DR003-Tula la red de drenaje es de 214.65 km, de los cuales 138.37 km pertenecen a la red mayor y 76.28 km a la red menor.

6.3.6. *Producción agrícola*

En el DR003-Tula se tienen dos ciclos agrícolas Primavera-Verano y Otoño-Invierno; también se atienden segundos cultivos y cultivos perennes. Los cultivos perennes destacan por la superficie cosechada ($\pm 26,000$ ha), siendo el más importante de ellos la alfalfa (99%), lo que lo convierte en el cultivo más importante en el distrito de riego en cuanto a superficie sembrada.

En el ciclo Primavera-Verano se tienen cosechan aproximadamente 18,000 ha, de las cuales el 73% corresponden a maíz, segundo en orden de importancia por superficie

sembrada en el Distrito. Entre los forrajes destacan en superficie cosechada la avena (1,400 ha) y cebada (1,000 ha).

Estos cultivos tienen un bajo valor comercial; sin embargo, la razón de su siembra es porque el agua de riego que se utiliza es de origen residual (en su mayoría), lo que limita el padrón de cultivos que se puede manejar. El nivel tecnológico del DR003-Tula, es de 0.49% localizado en el módulo Actopan con 35 hectáreas de riego por aspersión y 15 hectáreas por goteo.

La problemática que existe en el Distrito incluye los siguientes aspectos: nivel tecnológico bajo, inexistente cultura de ahorro de agua, falta de nivelaciones de tierra y preparación adecuada en tiempo y forma de los terrenos para recibir el riego.

La superficie de riego sustentable con las condiciones actuales de eficiencia de conducción y de aplicación para el DR003-Tula es de 50,173.63 ha.

6.3.7. Jerarquización de los principales problemas

Principales problemas que tiene el DR003-Tula:

- El agua utilizada es agua residual, lo cual de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, no es apta para el cultivo de hortalizas de consumo en fresco o sin cocinar. Además, el agua residual ocasiona el acarreo y depósito de diversos materiales entre los que se tienen envases plásticos, bolsas de plástico, llantas, colchones, etc.; situación que aumenta los costos de producción.



Figura 3 . Basura acumulada en los canales de conducción del agua residual

- La composición química de las aguas residuales ocasiona la disminución de la vida útil de la infraestructura hidroagrícola, por lo que las compuertas, represas y tomas granja deben ser reemplazadas por lo menos cada tres años. Además los gases generados por las aguas negras ocasionan la corrosión del concreto de las estructuras tales como alcantarillas y túneles. (Plástico, azolve, compuerta).



Figura 4 Aspecto de compuertas y conducción del agua residual

- La operación hidráulica del Distrito es muy complicada debido a su red de distribución, ya que ésta no se construyó con base en un plan general de origen y el desarrollo de la infraestructura hidráulica ocurrió en función de los diferentes puntos de las descargas de las aguas provenientes del Valle de México, los cuales han cambiado a través del tiempo.
- El 70% del volumen utilizado es de derivación y el 30 % es de presas de almacenamiento. El volumen de derivación presenta variabilidad en las 24 horas del día (de 12 m³/s a 40 m³/s con picos de hasta 360 m³/s en época de lluvias).



Figura 5 Canales revestidos para la conducción del agua residual

- El 50 % de la red de canales principales y secundarios está revestido de tierra, lo cual aunado al mal estado de las estructuras de control (compuertas y represas), ocasiona pérdidas por infiltración y fugas, dando como resultado una eficiencia de conducción a nivel sistema de 63%.



Figura 6 Canales de tierra para la conducción del agua residual

- Atomización de las tierras agrícolas (1.5ha/usuario promedio), que implica que cada canalero atienda de 1,000 a 2,000 ha.



Figura 7 Aspecto habitual de la tierra de cultivo después del riego

- Bajo nivel tecnológico de irrigación que da como resultado aplicación de grandes láminas de riego y baja eficiencia del agua. Dicho resultado que se explica por la irrigación por gravedad en el 99.99% de la superficie del distrito y falta nivelación de tierras.

6. 4. La contaminación: Conceptos, legislación y normatividad

6.4.1. La contaminación del suelo y el agua

Un suelo contaminado es aquel que ha superado su capacidad de amortiguación para una o varias sustancias y como consecuencia, pasa de actuar como un sistema protector a ser causa de problemas para el agua, la atmósfera y los organismos. Al mismo tiempo en dicho suelo ocurren desequilibrios biogeoquímicos y aparecen cantidades anómalas de determinados componentes, que originan modificaciones importantes en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Tan, 2009). Según este autor dicha situación implica que el contaminante quedará disponible para ser aprovechado por los organismos y la fauna del suelo, así como por las plantas y de ahí transportarse al resto de la cadena alimenticia, o bien, que tenga la posibilidad de desplazarse por el perfil y a través del tiempo llegar a los mantos freáticos. Entre los efectos que causan algunos elementos tóxicos absorbidos por los cultivos se encuentran los siguientes: a) aluminio, el cual inhibe

la división celular y ocasiona alteraciones a nivel celular; b) arsénico, que reduce el crecimiento y altera el aprovechamiento de diversos nutrientes (calcio, potasio, fósforo y manganeso); c) mercurio, cadmio y cromo, los cuales inhiben la fotosíntesis al alterar la síntesis de clorofila y la transpiración; y d) plomo, que tiene efectos deletéreos sobre la acción de las enzimas.

Entre los principales riesgos de los elementos tóxicos está su acumulación sin que se pierda su capacidad tóxica. Es posible que se almacenen sin provocar daños al ambiente por estar inactivos, pero tan pronto se tengan las condiciones propicias (como pudiese ser el cambio del medio químico), retornarán a la condición activa y podrán causar daños severos, lo cual se presenta tanto en moléculas orgánicas de alta persistencia como en los denominados metales pesados.

Para conocer el grado de contaminación del suelo se debe detectar la presencia de los elementos, definir los máximos niveles admisibles así como los factores que influyen en la respuesta del suelo como es la susceptibilidad del medio, capacidad amortiguadora, movilidad, formas solubles y tiempo de residencia, entre otros, para estimar su impacto potencial y planear las actividades de control y rehabilitación. El grado de vulnerabilidad de un suelo es inverso a su capacidad amortiguadora, la intensidad de afectación, cinética de reacción, consecuencias inherentes a la alteración de las propiedades edáficas, así como la evolución de las reacciones que ocurren entre la fase sólida y líquida del suelo. Los ciclos biogeoquímicos le confieren al medio edáfico una serie de capacidades de acción contra los elementos tóxicos a través de la filtración, descomposición, neutralización, inactivación y almacenamiento, entre otros, al mismo tiempo le brinda al suelo la función de protección hacia los ciclos hidrológicos y biológicos. Sin embargo, la aptitud edáfica de depuración tiene un límite definido y cuando es rebasado deja de ser eficaz, convirtiéndose incluso como un medio aportador de sustancias peligrosas para los organismos que viven en él o de otros medios relacionados (Hillel, 2008).

La contaminación del agua ocurre cuando se altera su composición y calidad de manera perjudicial, como consecuencia de los usos posteriores a la que fue sometida o que modifica su función ecológica. Por ejemplo, la concentración del oxígeno está en balance entre la atmósfera y los cuerpos de agua, pero cuando se vierten sustancias orgánicas

degradables en el medio se altera en detrimento del oxígeno en el agua, creando una condición anaerobia y con ello la reducción de diversos compuestos para producir amoníaco, ácido sulfhídrico y sulfuros, entre otros, con efectos deletéreos sobre los ecosistemas acuáticos y la calidad del agua. Este efecto es trascendental pues la mayoría de los cuerpos de agua del mundo están contaminados por el fenómeno de la eutrofización (Schindler, 2009). Cuando se trata de compuestos tóxicos orgánicos e inorgánicos se perjudica la cadena trófica a todos los niveles, incluso si se trata de materia en suspensión porque se reduce la luminosidad, afecta el sistema respiratorio de los animales y su capacidad de filtración.

El agua que está contaminada por desechos orgánicos y excreciones de diverso tipo procedentes de seres humanos o animales, se le suele denominar de diversas maneras como *agua negra, residual, servida, municipal, fecal o cloacal*; sin embargo, hay quienes en cuestiones de terminología hacen la diferencia siguiente: *aguas servidas* si provienen del uso doméstico; y *aguas residuales* si están mezcladas con desechos de la industria o si están combinadas con el drenaje de la precipitación pluvial (Ramalho, 1996). El riesgo sanitario de los desechos domésticos está en la transmisión de enfermedades ocasionadas por diferentes patógenos, lo cual se detecta a través del análisis del contenido de coliformes totales y fecales, salmonellas y virus. Respecto a las que están alteradas por descargas industriales adicionalmente contienen elementos químicos potencialmente tóxicos, denominados de manera genérica como “metales pesados”.

Es frecuente que se defina a los metales pesados como elementos tóxicos, los cuales existen de manera natural por la intemperización de los minerales del suelo o como consecuencia de diversas actividades humanas, siendo los más peligrosos por el daño que ocasionan el mercurio, plomo, cadmio, cromo y arsénico (Hogan, 2010). En contraste, hay algunos elementos que son esenciales para los organismos vivos como el hierro, cobalto, cobre, manganeso, molibdeno, y zinc, pero que cuando superan los límites máximos ocasionan efectos dañinos a los seres vivos.

La contaminación con metales pesados proviene de diversas fuentes siendo la principal el drenaje industrial (Vargas, 1996). Los metales pesados no son biodegradables y para la rehabilitación del medio deben removerse por técnicas de fitorremediación (Bernal et

al., 2007) o a través de microorganismos especializados, ya que de lo contrario su acumulación incrementará el riesgo de causar daños en uno o más de un eslabón de la cadena trófica.

En el agua se distinguen tres tipos de partículas: suspendidas, coloidales (sólidos suspendidos totales, SST) y en solución. Según (Valdez *et al.*, 2003), las aguas servidas contienen 1% de sólidos en solución y suspensión, siendo estos últimos de origen orgánico e inorgánico. Los inorgánicos contienen nitrógeno (como nitratos y amonio), fosfatos, cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, arsénico, cianuro, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc, mientras que los orgánicos se clasifican en nitrogenados (proteínas, aminas y aminoácidos) y no nitrogenados (celulosa, grasas y jabones).

Se emplean diversas técnicas para valorar la calidad del agua. Para detectar la presencia de materiales orgánicos se usa la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) que mide básicamente el carbono del material orgánico y la DBO20 para determinar el carbono y nitrógeno orgánico. Los otros parámetros que se usan para caracterizar el agua residual son la temperatura, pH, sólidos en suspensión totales (SST), materia orgánica valorada como TOC, nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniacal y nitratos, fósforo total, nitritos, sulfuros y sólidos disueltos.

6.4.2. *Leyes y normas relacionadas con la contaminación en México*

De acuerdo a cuatro Secretarías de Estado ha quedado la iniciativa de la publicación del total de las Normas Oficiales relacionadas con la contaminación en México, estas son: la Secretaría del Medio Ambiente con 18%, la de Comunicaciones y Transportes con 20%, Desarrollo Social con 24% y la de Desarrollo Urbano y Ecología con 28%.

Los temas abordados en las distintas Normas Oficiales se asocian con varios tópicos (Figura 8) como son el uso de lodos y biosólidos, el uso del riego agrícola con aguas residuales, el suelo, agua residual en general, residuos peligrosos y contaminación (atmosférica, acuíferos y derrames de combustibles, entre otros).

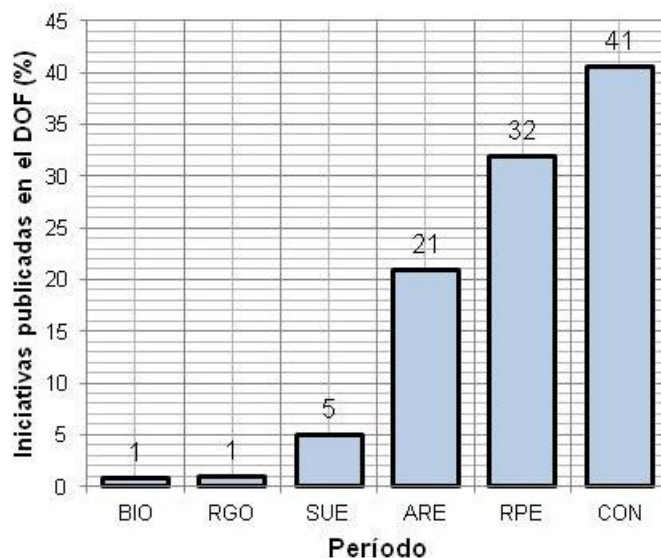


Figura 8 Temas de las iniciativas publicadas en el Diario Oficial de la Federación en Normas Oficiales, Proyectos de Normas, modificaciones a las mismas, avisos, entre otros de 1955 a 2013 (BIO=biosólidos; RGO=riego; SUE=suelos; ARE=agua residual; RPE=residuos peligrosos; CON=contaminación).

El tema central que nos ocupa en el presente documento tiene que ver con las aguas residuales y su uso como fuente de riego para la producción agrícola. Al respecto en la legislación mexicana hay varias Normas Oficiales que abordan los problemas de contaminación del suelo, las cuales se presenta en el Cuadro 4.

Cuadro 4 Normas Oficiales publicadas en el Diario Oficial de la Federación en relación a la contaminación del suelo

Norma Oficial	Tema	Propósito de la Norma
NTE-CRN-001/92	Suelos forestales	Protección y conservación de los suelos
NOM-060-ECOL-1994	Suelos y agua	Mitigar efectos adversos del aprovechamiento forestal
NOM-EM-138-ECOL-2002	Contaminación por hidrocarburos	Fijar los límites permisibles, caracterización del sitio y restauración
NOM-138-SEMARNAT/SS-2003	Contaminación por hidrocarburos	Fijar los límites permisibles, caracterización del sitio y restauración
NOM-138-SEMARNAT/SA1-2008	Contaminación por hidrocarburos	Fijar los límites permisibles, caracterización del sitio y restauración
NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012	Contaminación por hidrocarburos	Fijar los límites permisibles, caracterización del sitio y restauración

Norma Oficial	Tema	Propósito de la Norma
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	Contaminación por elementos químicos	Determinar las concentraciones de elementos químicos tóxicos

El 14 de octubre de 1993 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación dos Normas Oficiales para evaluar las aguas residuales que se destinan para el riego agrícola: la NOM-CCA/032-ECOL/1993 para presencia de contaminantes y la NOM-CCA/033-ECOL/1993 para condiciones bacteriológicas.

La NOM-CCA/032-ECOL/1993 especifica diferentes valores que debe contener como máximo el agua residual antes de ser descargada, como son pH, conductividad eléctrica, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, aluminio, arsénico, boro, cadmio, cianuros, cobre, cromo total, hierro, fluoruros, manganeso, níquel, plomo, selenio y zinc. A su vez, aún en caso de cumplir con lo estipulado si se causan problemas al terreno de cultivo, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos a través de la Comisión Nacional del Agua establecerá límites máximos permisibles más estrictos y complementar el análisis con las siguientes variables: demanda bioquímica de oxígeno, fósforo total, grasas y aceites, nitrógeno total, otros metales pesados, relación de adsorción de sodio, sustancias activas al azul de metileno (moléculas poco solubles en solución acuosa que influyen en la tensión superficial del agua), temperatura, tóxicos orgánicos y unidades de toxicidad aguda con *Daphnia magna*, crustáceo que se suele emplear en ensayos de tipo eco-toxicológico, con base en la norma ISO 6341 (1982). Con su entrada en vigor, se abrogó la norma técnica ecológica NTE-CCA-032/91 expedida el 24 de septiembre de 1991 y según quedó establecido en el Diario Oficial de la Federación, esta nueva norma no coincide con ninguna en el contexto internacional y queda a juicio de la autoridad competente el plazo para el cumplimiento parcial o total de los límites máximos permisibles señalados.

La NOM-CCA-O33-ECOL/1993 se creó ante la necesidad de normar el uso de las aguas residuales que por su contenido de patógenos y su empleo como fuente de riego de cultivos agrícolas pudiesen afectar la salud humana. Fue así que en octubre de 1993 la publicaron en el Diario Oficial de la Federación las Secretarías de Agricultura y Recursos

Hidráulicos y de Salud, a través de la Comisión Nacional del Agua y la Dirección General de Salud Ambiental. Esta norma no coincide con ninguna en el plano internacional y su énfasis está puesto de manera exclusiva en la calidad bacteriológica del agua, mediante el análisis de coliformes fecales y totales.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 se publicó el 6 de enero de 1997 en la que hace referencia a los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, para proteger su calidad y posibilitar sus usos, con énfasis en la determinación de contaminantes químicos y biológicos. Contaminantes básicos: grasas y aceites, sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Patógenos: coliformes fecales, huevos de helminto; Metales pesados y cianuros: arsénico, cadmio, cobre, plomo, zinc y cianuros. En su publicación en el DOF se menciona que no hay concordancia con ninguna norma previa en México ni coincidencia con alguna a nivel internacional. Cabe mencionar que al editarla hubo varios errores que se corrigieron mediante una aclaración en el DOF el 1 de abril de 1997.

6. 5. Antecedentes de la calidad del agua en el Valle del Mezquital

6.5.1. Calidad del agua en los acuíferos en el Valle del Mezquital

En el Valle del Mezquital hay un exceso de recarga por la conducción y uso excesivo del agua de riego que incluso ha creado la formación de acuíferos superficiales artificiales, pero con el inconveniente de que se trata de la circulación de agua negra cruda.

Los niveles de contaminación de los acuíferos pueden tener efectos nocivos a la salud pública, de ahí que en algunas regiones del país se limiten los usos de dicha agua. Las fuentes de contaminación química y microbiológica son diversas como es la disposición de efluentes de desecho, lodos, sólidos, desagües urbanos y agroquímicos, entre otros (Robles *et al.*, 2011).

Los acuíferos representan las principales fuentes de abastecimiento de agua en México y es fundamental que este recurso sea apto para el consumo. Sin embargo, cada vez hay más reportes que previenen la mala calidad del agua procedente de dichos aprovechamientos como es el caso de la presencia de patógenos entre ellos amebas de vida libre (AVL) en el área de Tizayuca, Hidalgo, capaces de causar enfermedades en el ser humano. En contraste, Ramírez *et al.*, (2012) indican que aún no se ha comprobado de manera fehaciente el riesgo en consumir el agua de los acuíferos, pero que sin lugar a dudas debe desinfectarse previamente a su consumo para evitar problemas de salud. En contraste, las aguas residuales que llegan al Valle del Mezquital contienen Di-2-etilhexil ftalato (DEHF), compuesto que causa problemas de tipo endócrino y probable agente carcinogénico (EPA, 1992). Esto tiene relevancia en cuanto a que la biomasa microbiana no es capaz de biodegradarlo de manera eficiente, el cual se adsorbe de manera significativa sobre la superficie de los suelos y lo hace de manera diferencial según la capacidad amortiguadora del medio edáfico (León, 2010).

Jiménez y Chávez (2004) mencionan que hay un evidente proceso de purificación del agua residual con la que se recarga el acuífero porque los suelos tienen la capacidad de tratar el agua negra y con ello convertirla en agua de aceptable calidad para el consumo humano. En contraste, Page *et al.* (2010) al realizar un estudio de riesgo microbiológico concluyen que hay un alto riesgo de contaminación del acuífero por dos razones: a) no

hay un tratamiento previo del agua residual que se infiltra; b) el tiempo de residencia del agua descargada al acuífero no es el suficiente como para que se depure por procedimientos naturales.

En el Valle del Mezquital hay seis grandes grupos de rocas cuyas características hidrogeológicas con diferente porcentaje de permeabilidad, que se comparan con las hidrogeoquímicas representadas por sus distintas facies químicas del agua. También existen tres mantos acuíferos cuya litología, comportamiento e influencia de las aguas negras empleadas para el riego dentro del sistema hidráulico general, guardan plena relación con la estructura geológica del área. Esto lleva a que existan tres grupos hidrogeoquímicos en los que destacan $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}; \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$, lo que indica una familia predominante de aguas sódica-bicarbonatada. Los grupos restantes están representados por las familias mixta-bicarbonatada y cálcica-bicarbonatada, donde las facies de tipo aniónico están definidas por los bicarbonatos y en la catiónica se observa un intercambio entre sodio y calcio con sus mezclas correspondientes (Del Arenal-Capetillo, 1985).

Marín *et al.* (1998) estudiaron diferentes acuíferos de México y entre ellos a los del Valle del Mezquital, con la idea de proponer un método alternativo rápido y eficaz para evaluar la calidad inorgánica del agua, relacionando la conductancia específica (SC) con los sólidos disueltos totales (SDT). La ecuación que obtuvieron fue $SC = 1.40(\text{SDT}) + 18$, la cual proponen para monitorear los suministros de agua potable, pozos y reservorios, proponiendo valores que previenen de posibles riesgos de contaminación y advierten la necesidad de hacer un estudio geoquímico en detalle.

La actividad agrícola y en especial la fertilización es la principal razón por la que puede haber un incremento en la concentración de nitratos, siendo los pozos menores a 30 m de profundidad los más vulnerables, ya que en los acuíferos no consolidados tienen concentraciones más altas respecto a aquellos que sí lo están. Antón y Díaz (2000) registraron 80 mg/L de nitrato en el agua subterránea del Valle del Mezquital, cuyo origen se asocia al contenido de nitrógeno en el agua residual que se utiliza para el riego agrícola.

De acuerdo con Lesser *et al.* (2011), el Valle del Mezquital recibe alrededor de 50 m³/s de agua residual no tratada proveniente de la Ciudad de México a través del Gran Canal del Desagüe, el Interceptor Poniente y el Emisor Central. Esta agua se utiliza para irrigar más de 50 mil hectáreas y parte de ella se infiltra hacia el acuífero porque 81% de los canales principales y 52% de los laterales no están revestidos, lo que facilita su tránsito hacia el acuífero. En la investigación de estos autores detectaron un acuífero superficial y otro profundo, de lo cual aún había registro. Como resultado del balance de aguas subterráneas, encontraron que la principal entrada de agua al acuífero corresponde a la infiltración de las aguas residuales sin tratar a través de canales y retornos de riego. Las salidas de agua del acuífero se realizan a través de manantiales que descargan al río Tula, por la explotación de pozos, y por flujo superficial hacia el norte y noreste (drenado por el río Salado) y subterránea. Durante 2007 se observaron profundidades entre 10 y 40 m para el nivel estático, con un flujo de agua subterránea de sur a norte. El cálculo del balance del agua subterránea mostró que las entradas subterráneas equivalen a 10.6 Mm³/año, la infiltración es de 165 Mm³/año, la extracción 97.7 Mm³/año, salidas subterráneas 71.7 Mm³/año, el cambio de almacenamiento es cero y la evapotranspiración es 6.1 Mm³/año. También se determinó la calidad del agua en 65 pozos donde el sodio y sólidos totales disueltos superan el límite máximo permisible para el consumo humano, así como arsénico, fluoruros y plomo, mientras que en el 50% de los aprovechamientos estudiados hubo presencia de coliformes totales y coliformes fecales.

6.5.2. *Calidad de las aguas superficiales en el Valle del Mezquital*

Una fuente localizada implica un transporte perceptible y delimitado desde el cual se descargan contaminantes sin incluir las que provienen de la actividad agrícola, de la lluvia, ni el caudal de retorno de regadío (FAO, 1997). Según la CNA (1995) la reutilización de las aguas negras en el Valle del Mezquital es benéfica por su aporte de materiales orgánicos, pero esto también contribuye al aporte de otros tóxicos porque el agua negra está compuesta por 43% de aguas industriales y 57% de aguas domésticas con un caudal de 45 m³/s en el estiaje y de 190 m³/s en época de lluvias (Pérez *et al.*, 2002).

Las aguas residuales circulan a lo largo del sistema hidrográfico de Zumpango-Ixmiquilpan, llegan a la cuenca del río Pánuco y desembocan en el Golfo de México. Así, la contaminación de las aguas también procede de fuentes no localizadas (difusa) como consecuencia de las actividades humanas sin que haya un punto claro de ingreso en los cursos de agua en los que se incorporan los contaminantes, haciendo complicado su control. Cuando la contaminación procede de fuentes localizadas como es el caso del desagüe, es más fácil su cuantificación y control.

El río Tula es el colector general del río Panuco en sus orígenes, nace en el cerro de San Pablo, que es el parte-aguas entre las cuencas del río Pánuco y Lerma y es el origen del colector general de la Región Hidrológica No. 26 que descarga en el Golfo de México. Dentro de la cuenca hay 11 municipios del Estado de México y 22 de Hidalgo. La ruta del agua desde el emisor central hasta su confluencia con la presa Endhó abarca 50 km de longitud.

La presa Endhó actúa como laguna de oxidación, en la que se degrada y baja la concentración de la materia orgánica que contiene el agua negra que ahí se almacena. De acuerdo con Pérez *et al.* (2002), la DBO en la época de lluvias disminuye por efecto de dilución. El fósforo total fluctúa de manera significativa por el drenaje que se incorpora de la Ciudad de Tula y Cruz Azul. La concentración de microorganismos es elevada con entradas difusas a lo largo del río, creando consorcios que pudiesen ser nocivos. En los últimos años la materia orgánica ha decrecido y la materia inorgánica ha aumentado. En la zona de la presa Requena no hay cambios, pero la zona centro-sur es la más contaminada así como los mantos acuíferos artificiales y jóvenes que se han creado; sin embargo, es donde la agricultura es más productiva (SEMARNAP, 2000). La Presa Requena ha recibido aguas residuales desde los años setenta, mostrando altos contenidos de plomo y que según Menchaca y Byrne (2012) está correlacionado con la presencia de este elemento en la atmósfera de la Ciudad de México.

En el Valle del Mezquital por el uso del agua residual sin tratar y las condiciones higiénicas muy deficientes, razones por las cuales prevalece las afecciones causadas por *Ascaris lumbricoides*, *Entamoeba histolytica* y *Giardia lamblia*. El análisis de las aguas residuales realizado por Reynoso *et al.* (2013) detectó la presencia de coliformes fecales

entre 2.1×10^4 NMP/100 mL y 2.4×10^{11} NMP/100 mL. De acuerdo con los resultados de Gutiérrez y Silva (1998), el agua de riego rebasó la Norma por contenido de coliformes totales y fecales, pero no contiene exceso de metales pesados, lo que atribuyen a los procesos de adsorción del suelo.

Las especies químicas en el medio acuoso son del tipo bicarbonatado (cálcico-magnésico) y especies sulfatadas (sódico-magnésicas). Las fases minerales que se forman son de tipo carbonatado (cálcico-magnésico) como calcita, aragonita y dolomita, que por su índice de saturación se precipitan y ocasionan incrustación de carbonato de calcio o magnesio, situación que origina el azolvamiento y reducción del gasto en las tuberías de conducción. Al incrementar la temperatura del agua, el índice de saturación de las fases minerales cambia por lo que aquellas que presentan problemas de precipitación se equilibran o se diluyen (Gutiérrez y Silva, 1998).

Reynoso *et al.* (2013) analizaron el agua negra en su trayecto desde que llega al Valle del Mezquital hasta que arriba a la presa Endhó, detectando que la DBO varió entre 1.16 y 486.81 mg O₂/L mientras que el oxígeno disuelto de 1.5 a 5.8 mg/L, situación que afecta el desarrollo de la vida acuática. Estos autores detectaron que la alcalinidad (458 mg/L) rebasó el criterio ecológico de calidad para agua potable. A su vez, las grasas variaron de 0.9 mg/L a 18.1 mg/L y el nitrógeno amoniacal varió de 0.1 y 64 mg/L, en ambos casos los valores rebasaron el límite permisible para la protección de la vida acuática. Las concentraciones de nitratos (6 mg/L), nitritos (0.5 mg/L a 1.3 mg/L), cadmio, plomo, hierro, manganeso y zinc rebasaron los límites normales de acuerdo a la Norma.

Según los resultados de Reynoso *et al.* (2013), las descargas de aguas residuales muestran que todas presentan una toxicidad valorada entre moderada y alta. Estos autores refieren que las actividades turísticas se han incrementado en la región, aprovechando la filtración natural de las aguas almacenadas en la presa Endhó, por lo que consideran la necesidad de conocer la calidad del agua y su efecto en los peces que en ella habitan y en su caso, advertir sobre los riesgos que esto pudiese traer.

El uso de las aguas residuales como fuente de riego es posible que ocasionen la salinización y sodificación del suelo, por lo que para prevenir lo anterior es necesario

evaluar la concentración de las sales solubles, la relación de adsorción de sodio y el pH o régimen fisicoquímico.

La actual orientación de la política hídrica en México da prioridad a la actuación de inversionistas privados, particularmente en el financiamiento, la construcción y la administración de infraestructura hidráulica bajo esquemas BOT (construir-operar-traducir). Las inversiones privadas se concentran en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales y en este contexto se debe entender el proyecto de la macro planta de tratamiento de aguas residuales en Hidalgo, la más grande del país y que se planeó para mejorar las condiciones sanitarias de la población y utilizar el agua tratada en la agricultura. Está previsto que su operación traiga cambios a un espacio regional construido a partir del envío histórico de las aguas residuales y así se espera una nueva estructura en el aprovechamiento del agua, en detrimento de quienes actualmente usan las aguas residuales aprovechando su abundancia y sus nutrientes.

6.5.3. *Calidad del agua en el Valle del Mezquital de acuerdo con la base de datos de los resultados analíticos de CONAGUA*

La evaluación de la calidad del agua residual en el Valle del Mezquital de los análisis contenidos en las bases de datos de CONAGUA a partir de seis Normas (Cuadro 5), el período comprendido entre el años 2000 y 2012 en trece sitios de monitoreo.

Cuadro 5 Normas empleadas para evaluar la calidad del agua de acuerdo con la base de datos de los resultados analíticos de CONAGUA

Norma	Parámetros analizados que están considerados en la norma respectiva
NOM-CCA-031-ECOL/1993	Conductividad eléctrica, Flúor, Grasas y aceites, pH, SAAM, Sólidos sedimentables, Temperatura
NOM-CCA-032-ECOL/1993	Coliformes fecales
NOM-001-ECOL-1996	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅), Fósforo total, Grasas y aceites, Nitrógeno total, Sólidos sedimentados, Sólidos suspendidos totales, Temperatura
Organización Mundial de la Salud (OMS)	Flúor, Manganeso, pH
Water Quality Index (Estados Unidos)	Coliformes fecales, Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅), P total, Nitratos, Oxígeno Disuelto, pH, Sólidos totales, Temperatura, Turbiedad

Norma	Parámetros analizados que están considerados en la norma respectiva
Unión Europea (UE)	Alcalinidad (como CaCO ₃), Cloruros, Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅), Demanda química de oxígeno, fósforo Inorgánico, fósforo total, Grasas, Amonio, Nitratos, Nitritos, Nitrógeno orgánico, Nitrógeno total, Oxígeno disuelto, pH, Sólidos disueltos fijos, Sólidos disueltos volátiles, Sólidos suspendidos fijos, Sólidos suspendidos volátiles, Sólidos totales, Sólidos totales fijos, Sólidos totales Volátiles

Los resultados de los análisis para determinar la calidad del agua también se compararon con los estándares propuestos por el Water Quality Index de los Estados Unidos, el cual toma en cuenta nueve parámetros como son coliformes fecales, pH, demanda bioquímica de oxígeno, temperatura, fósforo, nitratos, turbidez y sólidos.

Todas las muestras estudiadas tienen al menos algún valor que está fuera del límite máximo permisible indicado por las distintas normas que se utilizaron para evaluar la calidad del agua. Las determinaciones en las que todos pasaron la prueba excepto un sitio fueron la concentración de nitratos, nitritos, nitrógeno total, fluoruros y la conductividad eléctrica. En contraste, el oxígeno disuelto y los coliformes totales estuvieron fuera del rango, lo que implica que se trata de aguas con una excesiva contaminación biológica. En la Figura 9 se presenta de manera gráfica la calificación de la calidad del agua con base en los criterios del Water Quality Index de los Estados Unidos por sitio de monitoreo.

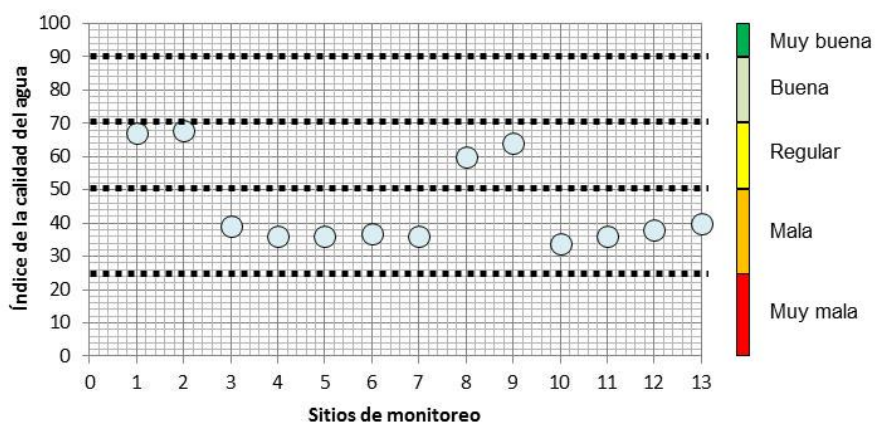


Figura 9 Calificación de la calidad del agua con base en la norma del Water Quality Index de los Estados Unidos, para cada sitio de monitoreo de la CONAGUA en el Valle del Mezquital.

De acuerdo con los 13 sitios de monitoreo de la CONAGUA en la región, 70% de sitios corresponde a mala calidad, 30% de ellos a calidad regular y ninguno de los sitios tiene calidad buena o superior. Esto se debe fundamentalmente a aspectos biológicos, ya que la base de datos que se estudió carecía de los análisis de la concentración de elementos químicos tóxicos.

6. 6. Antecedentes de la calidad del suelo en el Valle del Mezquital

6.6.1. *Los suelos del Valle del Mezquital*

En los suelos del Valle del Mezquital se encuentran cuatro series de suelos que se distribuyen de manera principal en el DR003-Tula:

- Actopan (Fluvisoles y Feozems háplicos)
- Tepatepec (Vertisoles pélicos y Feozems con propiedades vérticas)
- Lagunilla (Fluvisoles y Feozems calcáricos)
- Progreso (Leptosoles y Feozems calcáricos con fase petrocálica)

En general, los suelos presentan un ambiente químico entre neutro y alcalino, condición importante para la caracterización de los suelos desde el punto de vista químico puesto que la determinación del pH permite inferir la adsorción de metales pesados, ya sean que se encuentren libres o asociados a formas orgánicas o inorgánicas. Al respecto, Chapela (2010) asevera que en los suelos de tipo Vertisol de la región presentan una ligera tendencia a disminuir su pH según el tiempo bajo riego. Esto no es deseable ya que la acidificación provoca la movilización de cobre, zinc, plomo y cadmio.

Un aspecto sobresaliente en los suelos es el contenido de materia orgánica, puesto que en los suelos del Valle al ubicarse en un ambiente semiárido debería haber una baja concentración de reservas orgánicas; sin embargo, varios investigadores coinciden en señalar que en el medio agrícola edáfico del Valle del Mezquital se detectan valores altos de materia orgánica, la cual en los terrenos moderadamente alcalinos forma complejos solubles con metales. A su vez, Flores *et al.* (1992) interpretan que el contenido de materia orgánica en la región varía de medio a elevado. Esto se atribuye a una relación directa y proporcional entre los materiales orgánicos y los años de riego con aguas

residuales, como se reporta en el estudio de Chapela (2010) quien menciona que la concentración de nitrógeno total y C orgánico se acumulan exponencialmente, cuya asíntota la calculó entre 40 y 50 años.

Las texturas suelen ser limosas y con capacidad de intercambio catiónico de medio a alto (Flores *et al.* (1992). La presencia de poros y macro poros son rutas preferenciales para las aguas y los productos químicos, con mayor oportunidad para quedar adsorbidos en el complejo de intercambio.

De acuerdo con Gutiérrez *et al.* (2012), en la zona hay evidencias de presencia de materiales de cenizas volcánicas en sus primeras etapas de neo formación como son los geles de silicio poco evolucionados y minerales alófanos. Los suelos con estas condiciones evidencian coloraciones de amarillo-pálido a rojizas, textura franco-arcillo-arenosa y franco-arenosa. La acidez activa del suelo se presenta de ligeramente alcalino a muy fuertemente alcalino, con prevalencia de cargas negativas.

La formación del alófono depende del material geológico, vegetación y clima, por lo que los suelos con este tipo de minerales presentan una alta densidad aparente en condiciones húmedas y al deshidratarse se compactan. Gutiérrez *et al.* (2012) encontraron en los suelos de la región un contenido de Sílice superior a 50% en forma de geles y cristales amorfos de alofano.

6.6.2. *Acumulación de compuestos en los suelos de la región y riesgos de toxicidad*

Las aguas residuales se aplican en los terrenos agrícolas del Valle del Mezquital sin que haya de por medio algún tratamiento previo, por lo que existe la posibilidad de aporte de sustancias nocivas a los suelos, afectando su potencial productivo, y que estas sean absorbidas por los cultivos y se incorporen a la cadena trófica.

Flores-Delgadillo *et al.* (1992) compararon la concentración de cadmio, cobre, zinc y manganeso en suelos con más de 40 años de riego con aguas negras respecto a otros suelos libres de este problema. Estos autores encontraron que en el cobre se acumuló en el horizonte Ap. El manganeso y zinc se encontraron en los dos horizontes superficiales y el cadmio se distribuyó en todo el perfil.

Entre los autores que han evaluado la tasa de acumulación de elementos químicos en los suelos del Valle del Mezquital están Mascareño (1974), Gutiérrez (1982), Méndez (1982) y Hernández *et al.* (1990) con resultados variables. En algunos trabajos se detectaron incrementos (manganeso, cromo, plomo, cobalto y cadmio) o disminuciones (cobre y zinc), y en otros no se detectaron cambios (hierro y níquel).

La alteración de las condiciones del suelo por el manejo puede afectar la producción de los cultivos debido a que influye en la distribución de la materia orgánica y dinámica de nutrientes; como así también sobre la agregación y porosidad del suelo. En este sentido, Siebe (1994) analizó la tendencia con la que los metales pesados se acumulan en suelos con diferente condición, esto es, en su estudio eligió un suelo que había sido regado con aguas residuales durante 80 años, a otro sólo se le había aplicado agua extraída de pozo y el tercero era de secano. El suelo sometido a aguas negras acumuló cadmio, plomo, cobre y zinc en la capa arable en concentraciones entre tres y seis veces mayores respecto a los otros suelos; sin embargo, la disponibilidad de dichos elementos químicos fue moderada y no llegó a valores críticos. En cuanto a su disponibilidad, los dos extremos de mayor a menor están representados por el cadmio y cobre, como consecuencia de la inmovilización causada por la materia orgánica aportada por las aguas negras. A su vez, dicha autora considera que la moderada absorción de los metales por las plantas coincide con la alta capacidad amortiguadora de los suelos de la zona.

Chapela (2010) menciona que la concentración de metales pesados, nitrógeno total y carbono orgánico se acumulan en el suelo de manera directa y proporcional respecto a los años que han sido irrigadas las parcelas del Valle del Mezquital, como es el caso del plomo ($R^2=0.73$) y cadmio ($R^2=0.91$). Este autor generó para cada elemento estudiado una ecuación lineal cuya tendencia de variación de la pendiente es $Zn < Cu < Pb < Cd$, lo que atribuye a las distintas tasas de acumulación y con base en estos resultados propone la estimación de la variación en el tiempo de las concentraciones de estos elementos.

En seguimiento al estudio de Chapela (2010), se reporta que si se continúa regando con agua negra sin tratar, los elementos químicos rebasarán los límites máximos permisibles entre los 515 y 995 años para cobre, 400 a 500 años para zinc y de 14,200 a 33,050 años

para plomo, por lo que concluyen que el sistema de manejo actual no es sustentable a largo plazo, dado que la entrada de metales es mayor que su salida.

Los niveles altos de plomo, níquel y cadmio en los suelos y el agua de riego provocan su acumulación en el medio por su continuo depósito a través del agua de riego que los transporta, causando problemas de diverso tipo. Esto se debe a que no son ocupados en funciones metabólicas específicas y no son biodegradables. Por lo tanto, al estar disponibles para los cultivos causan toxicidad como ocurre con el mercurio, arsénico y cromo.

Las aguas residuales aportan detergentes, grasas, aceites y metales pesados a los suelos. Por ello, Flores *et al.* (2011) analizaron los suelos de Mixquiahuala en la que detectaron la siguiente tendencia de concentración: Pb>Ni>Cd>As>Cr>Hg. Los metales pesados se acumulan en el suelo aún en bajas concentraciones y es posible que queden disponibles para las plantas o lixiviarse. Este es el caso de Vertisoles irrigados con agua negra durante más de 50 años que tuvo como consecuencia el incremento en la capa arable de cadmio, cobalto, cobre, manganeso, níquel y zinc, los cuales se movilizan a través del tiempo y se alojan en todo el perfil.

El suelo modifica la tasa con la que se acumulan los elementos químicos como lo reporta Chapela (2010). Éste reporta para la región la edafo-secuencia Vertisol>Feozem>Leptosol, la cual indica las diferencias en la adsorción de los elementos, aunque dicho autor lo atribuye a la lámina empleada en las labores de riego por parte de los agricultores y cambia en el mismo sentido por la profundidad de cada suelo. A su vez, al analizar los cambios del contenido de metales pesados en los suelos entre 1990 y 2009, encontró que la variación es mayor en los primeros años de riego mientras que no hubo diferencias en los terrenos después de estar siendo regados con agua negra por más de 80 años. La varianza de la concentración de elementos químicos la encontró entre las parcelas y se incrementa con el tiempo en que han estado sometidas al riego con agua negra con más de 50 años.

La movilidad de los metales pesados varía con su estado de oxidación y por ello es posible evaluarla con base en su potencial de óxido-reducción. A su vez, como la irrigación se lleva a cabo por inundación, Juárez y Beltrán (2005) consideran que se

incrementa el riesgo de lixiviación de nutrientes y tóxicos contaminando el perfil del suelo y las aguas subterráneas. Incluso González (2009) establece que los problemas de exceso de sodio en los suelos son causados por el riego con aguas negras.

De acuerdo con Chapela (2010), las concentraciones de metales pesados en los suelos aún no son peligrosas, lo cual atribuye al efecto amortiguador del medio edáfico; sin embargo, menciona que hay señales de que se está llegando al umbral de saturación, donde el suelo ya no sería capaz de retener la carga de este tipo de tóxicos y se podrían lixiviar al acuífero o absorberse por las plantas. Por ello recomienda llevar a cabo un monitoreo regular de las parcelas a través de procedimientos capaces de detectar los cambios en sus concentraciones y prevenir los efectos ambientales adversos.

6.6.3. *Efecto residual de los elementos incorporados al suelo a través del riego con agua residual*

La aplicación de metales pesados al suelo a través del riego con aguas residuales no representa riesgo alguno para el potencial productivo de los suelos, ni tampoco ha aumentado a niveles preocupantes la incorporación de metales a la cadena trófica. No obstante lo anterior, este grupo de investigación considera que el riego con agua negra sin tratar no debe hacerse de manera ilimitada, porque los metales se acumulan en la capa arable, con la consecuente disponibilidad de estos para los cultivos.

Otros estudios se han enfocado a la evaluación del grado de contaminación de los suelos por el uso de las aguas residuales como fuente de riego. Al respecto, Cajuste *et al.* (1991) evaluó la adsorción de metales por el subsuelo proveniente del agua residual, encontrando contaminación por metales en sedimentos y plantas en las zonas irrigadas. En contraste, Ramírez-Fuentes *et al.* (2002) no detectó gran impacto de metales en muestras de sedimentos; sin embargo, advierten que en 30 años más podrían existir problemas de contaminación de metales en plantas.

Acosta (2007) evaluó la concentración de cromo, níquel, cobre, zinc y plomo en el suelo y en todos los casos detectó que se superó el límite establecido en la Norma, no obstante a lo anterior, todos los elementos analizados no estaban disponibles porque no se acumularon en el tejido de las plantas que evaluó, lo que se atribuye al ambiente alcalino del suelo.

De acuerdo con CNA y BGS (1998) a mediados de la década de los años noventa, la zona irrigada con aguas negras del Valle del Mezquital ya tenía entre 20 y 99 años, y ya que dicha irrigación no ha modificado su fuente de agua, a la fecha dicha práctica ya tiene casi 120 años en algunas áreas del Distrito. A pesar de ello, los trabajos reportados por Méndez (1982), CNA y BGS (1998), muestran que el agua residual empleada para riego no afectó la acumulación de elementos tóxicos y las concentraciones de estos están dentro de los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996. Esto mismo lo confirmaron Prieto *et al.* (2007) para diversos metales y metaloides incluidos en su estudio.

Los suelos y plantas expuestos a aguas negras tienden a adquirir un ambiente enriquecido por nitrógeno, lo cual es una condición propia del área agrícola del Valle del Mezquital, con un balance positivo a pesar de las pérdidas de este elemento por volatilización y desnitrificación, como consecuencia del tránsito del agua a través de canales abiertos. Más aún, a pesar de los inconvenientes del uso del agua negra sin tratar, King (1982) reportó una buena producción debido a los nutrientes que son aportados por dicha agua. En la misma condición la aplicación de fertilizantes inorgánicos incrementa considerablemente la productividad de los cultivos.

Las aguas residuales en el Valle del Mezquital aportan al suelo materia orgánica, nutrientes y otros compuestos químicos. Según Reyes *et al.* (2009), las sustancias húmicas (ácidos húmicos, fúlvicos y huminas) retienen y regulan la movilidad de los elementos metálicos en el suelo como el zinc y cobre que se asocian a los ácidos húmicos. Los ácidos fúlvicos retienen cromo, mientras que el plomo se distribuye entre ambas fracciones orgánicas. La retención metálica por sustancias húmicas se incrementa con los años en que han sido irrigados los terrenos.

Las vacas que pastorean sobre las praderas irrigadas con aguas negras acumulan elementos tóxicos y es posible que los pudiesen transferir hacia la leche que producen. Por tal razón Solís *et al.* (2009) hicieron un estudio para evaluar lo anterior y encontraron que no son tóxicas las concentraciones de plomo y otros metales pesados detectados en la leche de vacas alimentadas con pasturas del Valle del Mezquital.

Durante la década de los años ochenta y noventa se realizaron varios trabajos para evaluar la presencia de metales pesados en los suelos de la región en los que se obtuvieron resultados similares. Por ejemplo, Gutiérrez (1982) reportó la concentración total de cadmio (8 ppm), cobre (95 ppm), manganeso (600 ppm) y zinc (345 ppm), coincidiendo con lo reportado por Flores-Delgadillo *et al.* (1992) y Méndez (1982). García *et al.* (1988) evaluaron la concentración de plomo, cadmio y cromo en los suelos y tejido vegetal, donde los dos últimos superaron de manera escasa los niveles permisibles. Flores *et al.* (2012) consideran que los valores de cadmio, cobre, manganeso y zinc se han mantenido más o menos constantes en el transcurso de varios años.

A pesar de no detectar niveles superiores a la Norma, el común denominador en los estudios es la advertencia respecto a que si se continúa con el uso de aguas residuales sin tratar como fuente de riego, en un plazo definido es posible que la acumulación de tóxicos favorezca su lixiviación o que dichos tóxicos queden disponibles para que sean absorbidos por las plantas.

6.6.4. *Límite de tolerancia del contenido de elementos tóxicos en los suelos*

Los elementos químicos se evalúan con base en su efecto tóxico hacia los cultivos; sin embargo, es importante también tomar en cuenta las repercusiones de las interacciones entre los elementos sobre la absorción por las plantas, ya que aun con concentraciones menores a los límites permisibles, se afecta de manera negativa la actividad de la biomasa microbológica. De acuerdo con Vázquez *et al.* (2005), en México no hay información sobre la calidad del suelo y su relación con el contenido de metales pesados, por lo que los datos disponibles de otros países se usan para analizar las condiciones locales.

Siebe (1994) propuso establecer los límites de tolerancia para aguas residuales con fines de riego a través de la delimitación de los períodos de uso, considerando las diferencias existentes en la capacidad filtro y amortiguadora de los distintos tipos de suelo agrícolas, sugiriendo que se agotarán con mayor rapidez en suelos de textura más gruesa y de reacción ligeramente ácida que en los limosos y de reacción neutra a alcalina.

Ryan y Chaney (1994) propusieron rutas de transferencia de los elementos tóxicos a través de diversos modelos matemáticos, definiendo los límites máximos que pudiesen

ser permisibles para diversos contaminantes. En este sentido, Vázquez *et al.* (2005) proponen valores máximos tolerables de acumulación para el cadmio (8.3 kg/ha), níquel (312 kg/ha) y plomo (8.1 kg/ha) en el Valle del Mezquital.

Flores *et al.* (2011) analizaron los suelos de Mixquiahuala y no detectaron problemas en el agua de riego en su contenido de arsénico, cadmio, mercurio, níquel, cromo y zinc, mientras que el plomo fue el único que rebasó los límites permisibles de la Norma mexicana. No obstante lo anterior, estos autores al emplear las normas españolas, el arsénico, níquel y cadmio rebasaron los niveles permitidos.

Brizuela y Jiménez (2012) proponen que para el estudio de suelos potencialmente contaminados por metales pesados se deben definir los máximos niveles que pudiesen ser admisibles por no representar riesgo a la salud y a ellos llamarles niveles de referencia (NR).

La acumulación de tóxicos en los suelos se debe a las actividades humanas, pero también es posible que se deba a un contenido natural conocido como niveles de fondo (Aguilar *et al.*, 1999), que es propio de cada región edafo-geológica y por ello, Brizuela y Jiménez (2012) recomiendan establecer los niveles de referencia particulares para cada zona geográfica. Estos autores comentan que actualmente no hay una metodología única para establecer los niveles de referencia de los metales en suelos y a continuación se presenta los comentarios que hacen al respecto:

Los niveles de referencia (NR) representan una guía de valores a tener en cuenta en los trabajos de evaluación, donde se necesita tener una idea rápida del estado de contaminación de la localidad. Antes de que un suelo sea declarado como contaminado por metales pesados se requiere establecer su calidad a través de la determinación de los niveles de fondo de metales pesados y de los NR.

Hay una variedad de metodologías rigurosas aplicadas para establecer los NR, las cuales se asemejan al procedimiento seguido para establecer las normas de muestreo y se diferencian en el criterio estadístico para expresar los resultados. En la revisión de estudios de contaminación de suelos por metales pesados, la mayoría basan su discusión sobre si el sitio está o no contaminado con base en valores estándares fijados por otros países o agencias internacionales, aunque los

suelos en estudio no concuerden con las propiedades que dieron origen a la normatividad en la que se apoyan y así subestimar o sobrestimar la realidad. Pocos son los países que han establecido sus propios valores de referencia; sin embargo, la tendencia mundial hace énfasis en desarrollar los valores básicos para cada región y en cada país, lo que se complica por la heterogeneidad, dependencia del contexto geológico y edáfico, baja reproducibilidad, niveles de detección requeridos muy bajos, entre otros factores.

Mientras no haya una normatividad apropiada se seguirán tomando como guía los estándares internacionales ya establecidos y lo más adecuado será la utilización de los que se basan en fondos geoquímicos de propiedades semejantes al área estudiada. Por ello es indispensable revisar las normas establecidas para la protección y recuperación del suelo, actualizarlas según la tendencia mundial, incluir estándares de referencia, mejorar la gestión ambiental de sitios potencialmente o actualmente contaminados y contar con un instrumento que permita evaluar el impacto sobre el suelo de diferentes actividades industriales y agrícolas.

La contaminación de un suelo constituye una alteración del recurso y una posible transferencia de elementos tóxicos hacia otros receptores como el agua, aire, plantas, animales e incluso humanos, con consecuencias negativas sobre las entidades en comento y este es el caso de los metales pesados. En este sentido, Prieto-Méndez *et al.*, (2009) mencionan que la contaminación suele ser consecuencia de una mala gestión agrícola y de ahí que la valoración del suelo a través de niveles de referencia apropiados sea fundamental para prever los riesgos de toxicidad.

De acuerdo con Aguilar *et al.* (1999), el nivel genérico de referencia se define para cada sustancia como la concentración límite en el suelo que implica un riesgo aún admisible para la salud humana, lo cual es muy útil para delimitar o discriminar entre suelos sin o con riesgo. La EPA (1992) propuso procedimientos para calcularlos con base en su origen, exposición y tipo de contaminante a partir de criterios toxicológicos y ecotoxicológicos, aunque su aplicación se complica por el sinnúmero de variables que se requieren.

El Real Decreto de España RD 9/2005 propuso como alternativa para la evaluación de metales pesados su cálculo mediante la adición de dos veces la desviación estándar a la media aritmética de los contenidos totales de metales en suelos no contaminados, como alternativa para los sitios que no dispongan de niveles genéricos de referencia (BOE, 2005).

Los niveles genéricos de referencia no consideran las reacciones y equilibrios que se llevan a cabo en el suelo y que a su vez controlan la cinética de los metales pesados. Otra limitación que presentan es que se refieren a contenidos totales y no a las fracciones solubles, las cuales están asociadas a la movilidad del metal y el riesgo real de su toxicidad. De ahí que Castillo *et al.* (2003) sugiera establecer la relación entre los metales y las propiedades edáficas como es la capacidad amortiguadora edáfica, así como el vínculo entre la fracción mineral secundaria y los componentes orgánicos edáficos. Un aspecto importante en la evaluación de la contaminación de los suelos por metales pesados es que a nivel mundial aún no hay una metodología única que de manera explícita y estandarizada para determinar la calidad de los suelos.

6. 7. Antecedentes de la calidad de los cultivos en el Valle del Mezquital

6.7.1. La productividad agrícola en el Valle del Mezquital y su relación con el uso del agua residual como fuente de riego

La producción agrícola del valle del Mezquital se lleva a cabo en el Distrito de Desarrollo Rural 63-Mixquiahuala (con base en la nomenclatura de SAGARPA), el cual abarca una superficie de 461 mil hectáreas de las cuales 35% son agrícolas, 4% forestales y 44% de uso pecuario, donde destacan las zonas de Tula-Tepeji, Actopan e Ixmiquilpan como mercados regionales. El área agrícola tiene 60 mil ha de temporal y 100 mil de riego (Salgado, 2011).

Los principales cultivos en el área irrigada son el maíz y la alfalfa, que cubren 80% de toda la región del Valle del Mezquital. En el resto se encuentran avena, chiles y jitomates. También hay otros cultivos a pesar de que su producción está prohibida por los daños que pueden crear a la salud del ser humano, debido a que las partes comestibles de

estas plantas están en contacto cercano con el agua y el suelo, o también porque los productos son consumidos sin su previa cocción, como papas, remolachas, nabos, cebollas, ajo, lechuga y otras hortalizas (Flores et al., 2012).

En el plan estatal de desarrollo del estado de Hidalgo, se reconoce que el campo enfrenta problemáticas asociadas con la tenencia de la tierra, monocultivo y falta de financiamiento; además de las complicaciones para comercializar sus productos y el encarecimiento de los costos de producción, con la resultante baja competitividad (Altmann, 2007).

El PIB agropecuario creció en términos reales 2.55% entre 1999 y 2006, el cual muestra mayor dinamismo en comparación al resto de la economía estatal en su conjunto (INEGI, 2007). El sector agropecuario se ha desarrollado un crecimiento moderado y el PIB agrícola per cápita es mayor que el nacional. El estado cuenta con 298,309 unidades de producción, de las que 83% son menores a cinco hectáreas. Esta condición de minifundio implica una desventaja para la producción rural (INEGI, 2009).

En el estado predomina la producción con métodos artesanales y con base en el INEGI (2007), 2% de las unidades de producción transforman sus productos y de éstos 28% los llega a vender. Por ello, las áreas de oportunidad están en la implementación de buenas prácticas de manejo, así como mejorar rendimientos y prolongar su vida útil, por ser factores que contribuyen a la competitividad de una empresa agrícola y a la diferenciación de su producto, además de ofrecer mayor calidad y tener preferencia por los consumidores y ganar su fidelidad.

La tecnología utilizada impacta la productividad de los cultivos, por ello debe mejorarse para incrementar su competitividad. Al respecto, Ponce y Sánchez (2005) proponen el uso de invernaderos como alternativa para incrementar la productividad agrícola fuera de temporada de ciertos cultivos como es el jitomate tipo saladatte, sobre todo por las condiciones climatológicas que prevalecen en la región, pero esto sería viable sólo para un reducido número de personas.

Los costos de producción unitarios elevados se relacionan con bajos rendimientos que los productores han obtenido en los últimos años, de tal manera que sólo con la existencia de apoyos económicos, como el Programa de Apoyos Directos al Campo la producción

se vuelve rentable. La innovación es la base de la productividad y competitividad, sin perder de vista que los procesos de integración económica los modifican tanto a nivel regional como nacional. Entre los problemas que se advierten están los costos de insumos y medios de producción como semilla, fertilizantes, renta de maquinaria, mano de obra, costo de oportunidad de la inversión y renta de la tierra. Así como la falta de registros de los costos de producción por parte de los agricultores.

Rodríguez (1997) comenta que el bajo rendimiento de maíz bajo riego (4 t/ha) se debe al deficiente manejo agronómico del cultivo, ya que es posible obtener 10 t/ha cuando se siguen las recomendaciones de manejo como es el caso de la preparación del terreno, variedades, fecha de siembra, densidad de plantas, riegos, control de plagas y enfermedades y época de cosecha. Para la fertilización debe considerarse el tipo de agua de riego que se utiliza, por ejemplo, si es negra con incorporación tardía se sugiere no fertilizar, pero si es de reciente uso o si se mezcla, la recomendación es aplicar 80 kgN/ha y 40 kgP/ha, mientras que con el uso de agua blanca la dosis a aplicar es 120 kgN/ha y 60 kgP/ha.

De acuerdo con Betancourt *et al.* (2012), más de la tercera parte de la población económicamente activa se dedica al campo en el estado de Hidalgo; el Valle del Mezquital se ha caracterizado por sembrar maíz con semillas criollas de bajos rendimientos con rendimientos aproximados de 6 ton/ha, por lo que el gobierno impulsó el uso de semillas de maíz híbrido. Es así que a partir de 2000 se han comercializado en el estado más de 49 semillas mejoradas entre ellas V-30, H126, H129, H133, H135, H311 y H-151 de diversas empresas comerciales con rendimientos de 8 ton/ha, aunque durante la cosecha 2006 en algunos municipios del Valle del Mezquital el rendimiento disminuyó por plantas caídas, mazorcas de menor tamaño, granos de color negruzco y hojas decoloradas con la presencia de polvillo de color rosa.

Un factor que ha afectado la producción es la presencia de aflatoxinas las cuales tienen la habilidad de permanecer en el suelo por largos períodos, impidiendo el desarrollo de cultivos porque actúan como inhibidores microbianos impidiendo o retrasando la germinación de las semillas; por lo que pueden considerarse como bio-indicadores del deterioro ambiental. En México las aflatoxinas son las únicas micotoxinas que se regulan.

Sin embargo, en los años recientes el cultivo de maíz producido en el Valle del Mezquital sobresale por sus altos rendimientos con 8.5 t/ha en promedio (Garay *et al.*, 2010).

El uso de la maquinaria para la preparación del terreno representa una proporción importante de los costos de producción. De acuerdo al INEGI (2009), de un total de 166,699 unidades de producción en el estado, la problemática para el desarrollo de las actividades productivas se debe a las condiciones climáticas (86%), pérdida de fertilidad del suelo (29%) y alto costo de insumos y servicios (25%), así como la falta de capacitación y asistencia técnica (14%). Por ello, en el estado es necesario un mejoramiento tecnológico que incluya la eficiencia económica y preservación de las condiciones ecológicas para mantener el recurso suelo. El modelo de producción a inducir en la región deberá tener como objetivo el combate de la erosión, lo que implica reconvertir algunas de las zonas agrícolas en áreas de restauración ecológica. Para el campo hidalguense, es necesaria la organización de productores como base para la innovación así como la implementación de bitácoras de manejo administrativo y técnico para identificar las prácticas necesarias para los cambios tecnológicos (Garay *et al.*, 2010).

6.7.2. *La vegetación y los cultivos en el Valle del Mezquital*

La actividad biológica de un elemento, transporte, propagación, movilidad y capacidad de reacción varían según la forma química en que se encuentre, cuyo riesgo de toxicidad es función de la concentración permisible. En general, la absorción de los elementos contaminantes por las plantas se afecta por su disponibilidad específica y otros factores del suelo como es el pH, el potencial óxido-reducción, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, humedad, arcilla y concentración de nutrientes, así como las condiciones climáticas.

El contenido de elementos químicos en alimentos de origen vegetal y animal depende de los métodos de producción, procesado y lugar de origen, sobre todo por lo que está asociado con la composición del suelo. El concepto de bioacumulación está referido a la acumulación de contaminantes en los organismos y el índice de bioacumulación se expresa como la relación entre la cantidad de un contaminante en un organismo vivo y la concentración de ese contaminante en el suelo.

La hiperacumulación es la capacidad que tienen algunas plantas de concentrar metales pesados, los cuales se transportan a través de las células de la raíz y se distribuyen por el xilema, hasta que el elemento queda capturado sin afectar las funciones de la planta. Las raíces ofrecen una barrera contra la inserción de los metales pesados y como estos son de baja movilidad en el suelo no son fácilmente aprovechables, de ahí que la principal zona donde se alojan es la biomasa radical sin que se distribuyan a otros tejidos vegetales como si ocurre con el plomo. Las plantas hiperacumuladoras también se emplean para la limpieza de áreas contaminadas, con las ventajas de ser una tecnología de bajo costo y con impacto ambiental positivo. La respuesta de las plantas a los metales pesados es de carácter poligénico y su tolerancia se define como la capacidad natural o artificial regulada por factores genéticos y ambientales, para soportar su alta concentración por largo tiempo, sin que existan efectos negativos en su metabolismo.

Vegetación de las Áreas naturales y reforestadas

Durante la década de los años ochenta, en el Valle del Mezquital se inició la restauración de áreas forestales a través de la reforestación con especies de pino, casuarina, cipreses y eucalipto. Al cabo de 25 años se logró el establecimiento de 65 hectáreas con pino (*Pinus greggii*) en densidades entre 336 y 745 árboles por hectárea (Flores *et al.*, 2012).

La morera *Morus spp.* (*Moraceae*), originaria de las zonas templadas de Asia donde su cultivo inició hace 4,500 años, representa la parte agronómica de la industria de la sericultura por ser sus hojas el único alimento del gusano de seda. Los usos principales están tanto en la sericultura como el mejoramiento de ecosistemas, alimentación animal y humana. Las condiciones de suelo y clima en el Valle del Mezquital son apropiadas para la producción de morera y por ello se evalúa el impacto del riego con aguas negras sobre las plantaciones. En México la superficie de cultivo de morera es reducida y se ubica en San Luis Potosí, Oaxaca y Tabasco con variedades introducidas y locales (criollas), de las cuales se desconoce su capacidad de adaptación, su comportamiento morfológico y productivo en diferentes sistemas agroecológicos del país. Al respecto, Martínez *et al.* (2012) evaluaron la adaptación de tres variedades de morera en el Valle del Mezquital que fueron establecidas a principios de octubre de 2010 para el fomento de la sericultura, encontrando que el vigor y altura de planta no fue satisfactorio en todos los

casos, pero sí es factible el establecimiento de la variedad SLP3 que presentó una alta adaptabilidad en la región.

El arbusto deciduo espinoso *Mimosa aculeaticarpa* var. *biuncifera* que se distribuye en las zonas semiáridas de México tiene potencial para usarse en proyectos de restauración ecológica, pero de acuerdo con Pavón *et al.* (2011) no existe información básica que sustente esta afirmación. Estos autores determinan que la mayor sobrevivencia de plántulas y crecimiento de raíces se registran en condiciones de alta luminosidad. Los contenidos altos de nitrógeno en el suelo afectan negativamente la sobrevivencia y crecimiento de las plántulas, por lo que *M. aculeaticarpa* var. *biuncifera* debe destinarse a proyectos de restauración de las zonas semiáridas en México como es el caso del Valle del Mezquital.

El mezquite es un elemento importante en la vegetación de ambientes semiáridos por su valor ambiental. Desde el punto de vista biológico, las semillas de *Prosopis laevigata* presentan dificultades de germinación por la presencia de una testa impermeable causando una latencia física. En Hidalgo, *P. laevigata* se distribuye en el centro y norte del Valle del Mezquital, Ixmiquilpan, sureste de Actopan, noroeste y suroeste de Mixquiahuala. Aspectos como la edad de la semilla, tiempo de maduración e interacciones ambientales, pueden ser la causa de las variaciones en la respuesta de germinación de *P. laevigata*.

La planta *Tillandsia recurvata* es una epífita que tiene una buena capacidad receptora natural de contaminantes volátiles y de acuerdo con Zambrano *et al.* (2009), en el Valle del Mezquital la concentración de cromo en el tejido de *T. recurvata* es del doble respecto a la que se ha reportado en otros países y más de 40 veces la concentración de níquel, plomo y vanadio. Los valores más altos de diferentes tóxicos orgánicos y químicos se encuentran hacia el sur del Valle del Mezquital, donde está la zona industrial, respecto a la del norte de la región.

Producción de cultivos agrícolas

En el Valle del Mezquital se observa una alta productividad agrícola por efecto de los aportes de nutrientes y materiales orgánicos del agua residual; sin embargo, a través del

riego también se adicionan contaminantes como metales pesados que se acumulan en el medio ambiente y con el tiempo se transfieren a los seres vivos. La acumulación de metales pesados en sedimentos y suelos se lleva a cabo por procesos de adsorción, coprecipitación y otras formas de asociación natural, lo que acarrea consecuencias negativas al entorno ecológico, puesto que cuando se revierten las reacciones los elementos quedan libres en formas accesibles a los sistemas acuosos y seres vivos. En este sentido, se debe conocer la concentración total de los elementos acumulados en los suelos y a su vez la fracción que se acumula en el tejido vegetal.

El uso de plantas para dar seguimiento a los problemas de contaminación ambiental data desde la década de los años sesenta para detectar problemas originados por causas naturales o por la actividad del ser humano. Algunas plantas acumulan metales pesados dentro y fuera de sus tejidos por tener la capacidad de adaptarse a las propiedades químicas del medio, lo que las convierte en reservorios intermediarios para dichos elementos químicos, pudiendo transferirse a otros destinatarios.

Carrillo *et al.* (1992) detectaron concentraciones de cadmio que superan el límite permisible en México y la alfalfa regada con esas aguas contenía concentraciones de cromo y plomo superiores a los valores considerados normales en tejido vegetal.

Ante la disponibilidad de los elementos químicos en el suelo ocurre la absorción en concentraciones similares a la que existen en el medio edáfico. La acumulación de elementos tóxicos suele ser mayor en las raíces, que en semillas y frutos. La contaminación de arsénico puede deberse a las actividades humanas como la minería, que incrementa su contenido en el agua de pozos, norias y manantiales. Otro caso es cuando su abundancia se debe al intemperismo de minerales arsenicales como la arsenopirita, rejalgar, oropimento, loellingita, y tennantita (Núñez, 1999).

Según Cajuste *et al.* (2001), la fracción más activa de metales en el suelo se está incrementando lo cual coincide con lo reportado por Siebe (1995); sin embargo, no detectaron concentraciones superiores a los límites permisibles y lo mismo ocurrió en el trabajo reportado por Carrillo *et al.* (1992). Cajuste *et al.* (2001) comentan que la concentración total de plomo en el agua del Gran Canal de Desagüe fue 0.13 mg/L y en la presa Endhó 0.054 mg/L, lo cual se transfirió hacia el grano de trigo. Además, al evaluar

el cadmio mencionan que se acumula anualmente en el suelo entre 384 y 640 g/ha, asociando la concentración de cadmio, níquel y plomo con la antigüedad de riego con agua residual.

Solís *et al.* (2005) detectaron que los valores más bajos de pH y concentración de carbono orgánico total se encuentran en los suelos irrigados por más de 100 años con agua negra, en los que además hay biodisponibilidad de metales pesados. No obstante lo anterior, dicha situación no repercutió sobre el contenido de estos elementos en el tejido vegetal, aunque su concentración fue mayor en estos casos en comparación con las muestras vegetales colectadas en terrenos con 50 años de estar siendo irrigados con agua residual.

Acosta (2007) analizó la concentración de elementos tóxicos en los suelos de la región y reportó que había un exceso de ellos; sin embargo, cuando determinó su presencia en el tejido de diversos cultivos, detectó que en ningún caso hubo una acumulación significativa de elementos tóxicos, cuyos valores eran inferiores a los niveles máximos permisibles sin importar el tipo de suelo, localidad y tiempo de haber iniciado el riego con aguas negras en los distintos terrenos que estudió.

De acuerdo con Prieto *et al.* (2007) los cultivos de chile y frijol producidos en el Valle del Mezquital contienen una alta concentración de metales pesados tanto en el tejido vegetal como en el fruto, por lo que se consideran la necesidad de fijar criterios de calidad del agua de riego y suelo con base en la cantidad aceptable de metales acumulables

La contaminación por arsénico en agua y suelo puede estar relacionada con la acumulación de dicho elemento en la cebada maltera, Prieto *et al.*, (2010) evaluaron la absorción y transferencia de dicho elemento hacia órganos y tejidos de cebada pero en condiciones controladas. En sus resultados reportan una elevada acumulación de arsénico en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo y que variaron de manera directa y proporcional al tiempo de exposición. La raíz presentó la más alta concentración de arsénico (100 y 300 mg/kg), seguida por las hojas (80 a 180 mg/kg), tallo (70 a 110 mg/kg) y grano (40 a 90 mg/kg), lo cual resultó excesivo y altamente contaminante. La acumulación de arsénico puede causar efectos negativos sobre el mismo cultivo que los absorbe en valores de 0.7 mg/kg reduce en 50% el rendimiento de los cultivos.

Cayetano y Siebe (2012) evaluaron las concentraciones de plomo, cadmio, cobre y zinc en el grano de maíz y tejido de alfalfa en terrenos con diferencias en el tiempo en que han sido regados estos cultivos con agua negra sin tratar. De acuerdo con estos autores, los resultados que obtuvieron muestran un incremento lineal de la concentración de los metales en los tejidos vegetales proporcional al tiempo que las parcelas han sido sometidas al riego. Sin embargo, las concentraciones de metales detectadas son inferiores a los límites máximos permisibles. La transferencia de los elementos disminuye con el período de irrigación y se ajustó a una regresión lineal. Un aspecto interesante en los resultados es que estos fueron similares a los encontrados en estudios de hace 20 años, aunque hacen énfasis en que por el balance de masas entra más metal con el agua de riego del que extraen las plantas.

Mendoza *et al.* (2013) determinaron la tolerancia del maíz y frijol a diferentes concentraciones de metales pesados en los suelos agrícolas aledaños a la presa Endhó para evaluar y promover alternativas de biorremediación.

La contaminación es un problema ambiental relevante, porque es muy variada la composición y características de los elementos tóxicos, cuya interacción con los componentes edáficos es múltiple (fase sólida→fase líquida y viceversa) y ocurren reacciones simultáneas y diversas como las de óxido-reducción, sorción y precipitación, entre otras. La intensidad y magnitud se modifica por el medio edáfico como consecuencia de la interacción de los ambientes químico, térmico e hídrico, produciendo diversas formas químicas en el suelo con diferente grado de solubilidad y por lo tanto disponibilidad variable para los cultivos.

VII. Procedimiento

El estudio consistió en evaluar la concentración de diversos elementos químicos en el agua, suelo y cultivos por medio de muestras colectadas en el DR003-Tula, entre mayo y noviembre de 2013. Los análisis se llevaron a cabo en laboratorio, donde se siguió un riguroso control de calidad basado en la corrida de blancos, repeticiones y muestras patrón para asegurar la exactitud y precisión de la información generada, apoyado además con estándares de referencia del National Institute of Standards and Technology, (NIST, <http://www.nist.gov/index.html>) y en el programa de intercalibración North American Proficiency Testing Program, (NAPT, <http://www.naptprogram.org>) en su versión para análisis de suelo, planta y agua, integrante de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo.

La calidad del agua para el riego de las aguas residuales usadas en el DR003-Tula se determinó mediante la comparación de variables químicas, como las reportadas por el sistema de clasificación del Manual 60 del USDA (1954), FAO (1985), la NOM-001-ECOL-1996; esta última que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Y define a las aguas residuales como de composición variada proveniente de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícola, pecuaria, doméstica, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas. También se requirió de la NMX-AA-072-SCFI-2001 la cual tiene el procedimiento para determinar la dureza en agua por titulación. Donde la dureza se entiende como la capacidad de un agua para precipitar al jabón debido a la presencia de sales de calcio y magnesio. La dureza es la responsable de la formación de incrustaciones en recipientes y tuberías lo que genera fallas y pérdidas de eficiencia en diferentes procesos industriales como las unidades de transferencia de calor. El termino dureza se aplicó en principio por representar al agua en la que era difícil de lavar y se refiere al consumo de jabón, el cual está directamente relacionado con el contenido de calcio y magnesio.

En cuanto a la calidad del suelo y con base en las normas mexicanas se usó de la NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Entre la gama de métodos, las alternativas consideradas en esta regulación se enfocan hacia la evaluación de los suelos según el propósito, ya sea, de fertilidad, de salinidad o de clasificación. Para tal efecto, se hace uso de las metodologías más reconocidas en el ámbito nacional e internacional, mejor estudiadas, con una mejor y más fácil interpretación, las que presentan mayor correlación con la disponibilidad nutrimental y, sobre todo, aquellas que se pueden realizar con sencillez y economía. Y la norma oficial mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece los criterios para determinar las concentración de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Esta norma es de observancia obligatoria para todas aquellas personas físicas y morales que deban determinar la contaminación de un suelo con materiales o residuos que contengan los elementos antes mencionados.

7. 1. Muestreo y análisis del agua

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica que contrasta con las provenientes de diversos aprovechamientos como son presas, pozos, manantiales, entre otros. Por ello, se creó la norma NOM-001-ECOL-1996 en la que se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, la cual indica los procedimientos para coleccionar las muestras, su preservación y análisis, razón por lo cual se tomó como guía para la realización del presente trabajo. En la Figura 10 Ubicación del Muestreo de Agua se muestran algunos datos de la colecta de muestras por cada uno de los sitios seleccionados para coleccionar las muestras de agua en la zona de estudio.

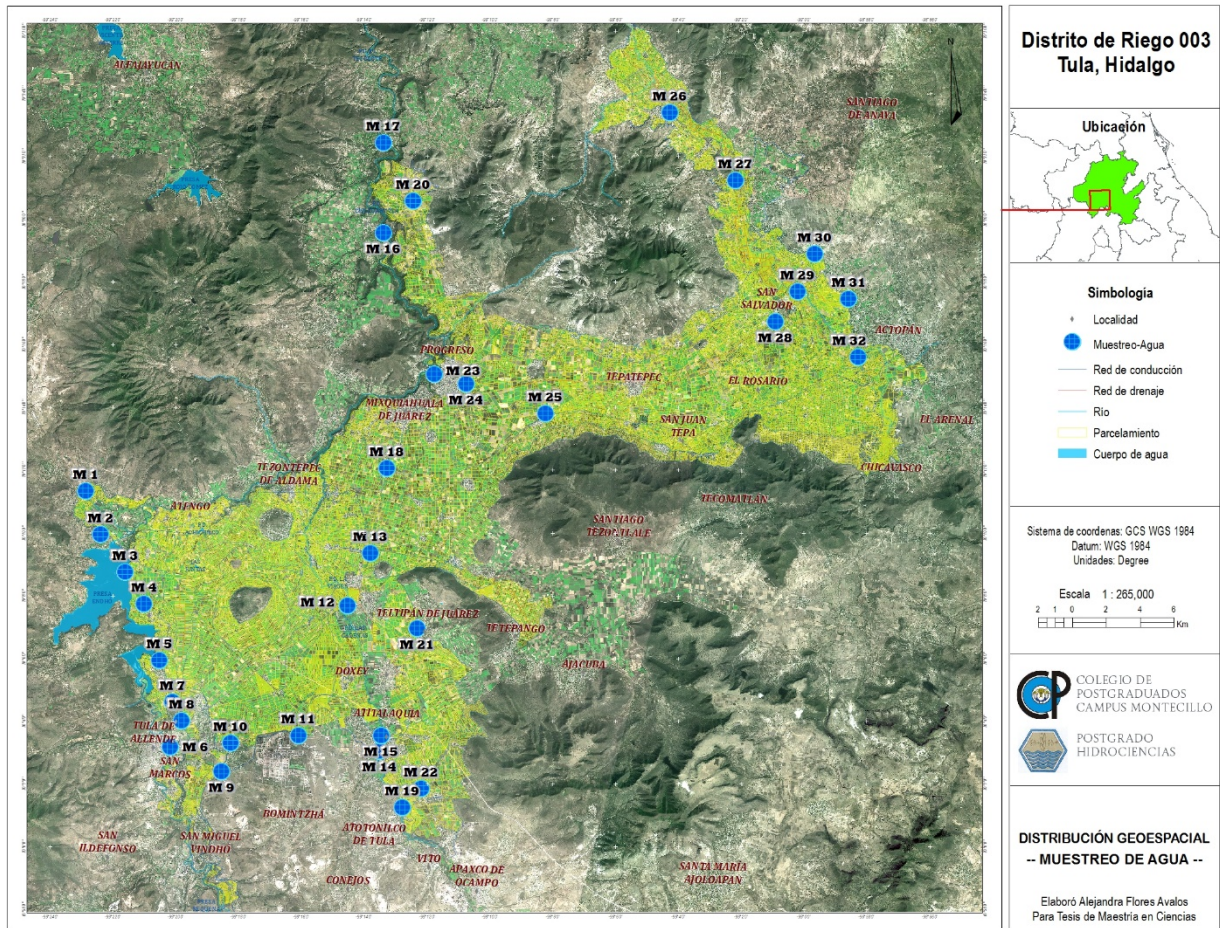


Figura 10 Ubicación del Muestreo de Agua

Para el transporte y conservación de las muestras se emplearon recipientes de polietileno de 2 litros de capacidad cada uno y hieleras para contenerlos. La boca de cada recipiente se cubrió con una película de parafina (parafilm), se colocó su tapa con rosca para asegurar la hermeticidad del frasco y evitar que la muestra se alterara o derramara. Para identificar las muestras se enumeraron los recipientes y en la libreta de campo se registró: coordenadas del sitio, fecha y hora del muestreo, y la temperatura del agua.

Se procuró que cada muestra representara lo más fielmente posible el efluente que se decidió colectar en cada caso. Previo al muestreo en áreas de difícil acceso se emplearon recipientes que sirvieron de auxilio para colectar la muestra, enjuagándola varias veces antes de recibir la muestra definitiva. En los lugares donde no había dificultad para tener acceso al efluente se tomó la muestra de manera directa del recipiente. Para el transporte de las muestras del sitio de estudio al laboratorio, se conservaron en un contenedor

(hielera) y hielo suficiente. En el mismo día se llevaron al laboratorio para que el análisis iniciara en el tiempo indicado por la norma (menor a tres días).

El análisis del agua se llevó a cabo en tres partes: a) evaluación de la calidad del agua de riego y su efecto sobre el suelo y los cultivos; b) indicadores del efecto de la calidad del agua sobre su conducción e infraestructura; c) los parámetros definidos por la NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Para evaluar la calidad del agua residual como fuente de riego se realizaron los siguientes análisis:

- pH
- Conductividad eléctrica
- Sólidos disueltos totales
- Cationes
 - Calcio
 - Magnesio
 - Potasio
 - Sodio
- Aniones
 - Carbonato
 - Bicarbonato
 - Cloruro
 - Sulfato
- Variables calculadas como índices de segundo grado
 - Relación de adsorción de sodio (índice de segundo grado)
 - Relación de adsorción de sodio ajustado (índice de segundo grado)
 - Carbonato de sodio residual (índice de segundo grado)

En cuanto a los indicadores del efecto de la calidad del agua sobre las instalaciones para su conducción, se determinaron con base en la generación de índices de segundo grado, los cuales se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6 Índices de segundo grado calculados para evaluar el efecto de la calidad del agua su capacidad corrosiva o incrustante sobre las instalaciones en las que se conduce en la zona de estudio

Método	Propósito	Fuente
Dureza del agua por carbonato de calcio	Evaluación del efecto del carbonato de calcio	Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition, 2005
Dureza del agua	Evaluación del efecto del calcio	Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition, 2005
Dureza del agua	Evaluación del efecto del bicarbonato	Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition, 2005
Dureza del agua	Propuesta francesa para evaluar la dureza del agua	Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition, 2005
Dureza del agua	Propuesta alemana para evaluar la dureza del agua	Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition, 2005
Dureza del agua	Propuesta inglesa para evaluar la dureza del agua	Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition, 2005
Alcalinidad por carbonato de calcio	Efecto del carbonato de calcio sobre la alcalinidad del agua	Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition, 2005
Índice de Langelier simplificado	Mide el estado de equilibrio del agua en relación con su carácter incrustante o corrosivo	Langelier W.F. 1946- Chemical equilibria in water treatment. Journal of the American water Works association 38(2):169-178
Índice de saturación o LSI	Evalúa la tendencia a la precipitación o disolución del carbonato de calcio	Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition, 2005
Índice de Ryznar	Evalúa la tendencia a la precipitación o disolución del carbonato de calcio	Ryznar JW (1949). A new index for determining amount of scale formed in water. Journal of the American water works association 36(2):472-486
Índice de Puckorius	Determina el carácter corrosivo o incrustante del agua tomando en cuenta su capacidad tampón o amortiguadora	Puchorius R and Loretitsch GR. 1999. Cooling water scale and scaling indices: what they mean-how to use them effectively-how they can cut treatment costs. Paper IWC-47, Int. Water Conference. Pittsburgh, PA.
Índice de Larson (Lal)	Evalúa la capacidad de corrosión del agua	Larson TE and Skold RV. 1958. Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron. Illinois State water survey, Champaign, IL.

Para el caso de la evaluación de las aguas residuales se hizo con base en lo descrito en la NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. En el Cuadro 7 se presentan las determinaciones realizadas a las muestras de aguas residuales colectadas, así como la norma específica donde se encuentra el método de análisis correspondiente, el volumen requerido y el procedimiento para su preservación.

Cuadro 7 Determinaciones realizadas a las muestras de agua residual para evaluar su calidad con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales

Determinación	Norma que contiene el método	Volumen sugerido	Preservación
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000	<i>In situ</i>	No requiere
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	<i>In situ</i>	No requiere
Sólidos sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2000	1 L	4°C
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	NMX-AA-028-SCFI-2001	1 L	4°C
Fósforo total	NMX-AA-029-SCFI-2001	0.5 L	4°C
Sólidos y sales disueltos	NMX-AA-034-SCFI-2001	0.5 L	4°C
Coliformes	NMX-AA-042-SCFI-2005	1 L	4°C
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000	1 L	HCl 1:1 (pH<2) y 4°C
Nitrógeno total	NMX-AA-026-SCFI-2001	2 L	HCl 1:1 (pH<2) y 4°C
Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn	NMX-AA-051-SCFI-2001	0.5 L	HNO ₃ (pH<2) y 4°C
As y Hg	NMX-AA-051-SCFI-2001	0.25 L	HNO ₃ (pH<2) y 4°C
Cianuro	NMX-AA-058-SCFI-2001	1 L	NaOH (pH>12) y 4°C

De acuerdo con la NOM-001-ECOL-1996, los resultados de los análisis de muestras de agua residual se expresan en miligramo por litro (mg/l) a excepción de pH, temperatura (°C), sólidos sedimentables (mL/L) y coliformes (NMP/100 mL).

7. 2. Muestreo y análisis del suelo

La planificación del muestreo del suelo se realizó con base en la recopilación, análisis de la información disponible de la región y recorridos de campo preliminares durante mayo y junio de 2013, de tal manera que se identificó la ruta a seguir para coleccionar zonas representativas del área de estudio con el propósito de conocer las condiciones actuales, prácticas habituales de manejo, prever los medios pertinentes para protección de la salud del personal involucrado en el estudio y preservación de las muestras. Durante esta parte del estudio sólo se coleccionó una muestra simple por sitio elegido, ya que el interés fue explorar la zona de manera general.

Para la selección de los sitios definitivos se coleccionaron las muestras a 0-20 cm de profundidad la cual se eligió con base en dos criterios: a) es la zona donde se ubica 90% de las raíces de los cultivos responsables de la absorción de agua y especies iónicas; b)

dada la escasa movilidad de la mayoría de los elementos químicos (nutrientes y tóxicos) da como consecuencia que la mayor concentración se encuentre en la capa arable en ambos casos.

Debido a que el origen de la contaminación de los suelos proviene del uso de aguas residuales como fuente de riego y esta práctica se lleva a cabo sólo por inundación por iniciativa de cada productor, se delimitó como unidad de muestreo a la parcela agrícola en la que se colectaron 5 submuestras para formar una muestra compuesta de un peso aproximado de 2 kg en total, donde cada muestra simple se ubicó al azar recorriendo todo el terreno. Las herramientas y el procedimiento para colectar las muestras de suelo se indican a continuación:

- Las herramientas que se emplearon fueron pico y pala recta libres de cualquier sustancia que pudiese ocasionar algún tipo de contaminación como son la presencia de óxidos, residuos de agroquímicos o fertilizantes, materiales orgánicos, suelo de otros terrenos, entre otros aspectos;
- Se retiró el material vegetal y piedras de la superficie, para hacer un hoyo amplio que facilitara la introducción de la pala de manera perpendicular para tomar una cara del hoyo realizado;
- El suelo recogido se colocó en una bolsa de plástico grande y limpia para que cupiera la muestra de manera holgada. Esta actividad se consideró como la colecta de una submuestra;
- Se repitió el mismo procedimiento cinco veces en cada parcela seleccionada para colectar todas las submuestras, las cuales se colocaron en una sola bolsa para integrar la muestra compuesta que sería analizada en el laboratorio.
- Cada muestra se identificó con base en las coordenadas del sitio (longitud, latitud y altitud), codificando esta información para facilitar las labores en el campo en la libreta de campo así como en la bolsa correspondiente.

La ubicación de cada uno de los sitios seleccionados para la colecta de muestras de suelo se presenta en la siguiente figura:

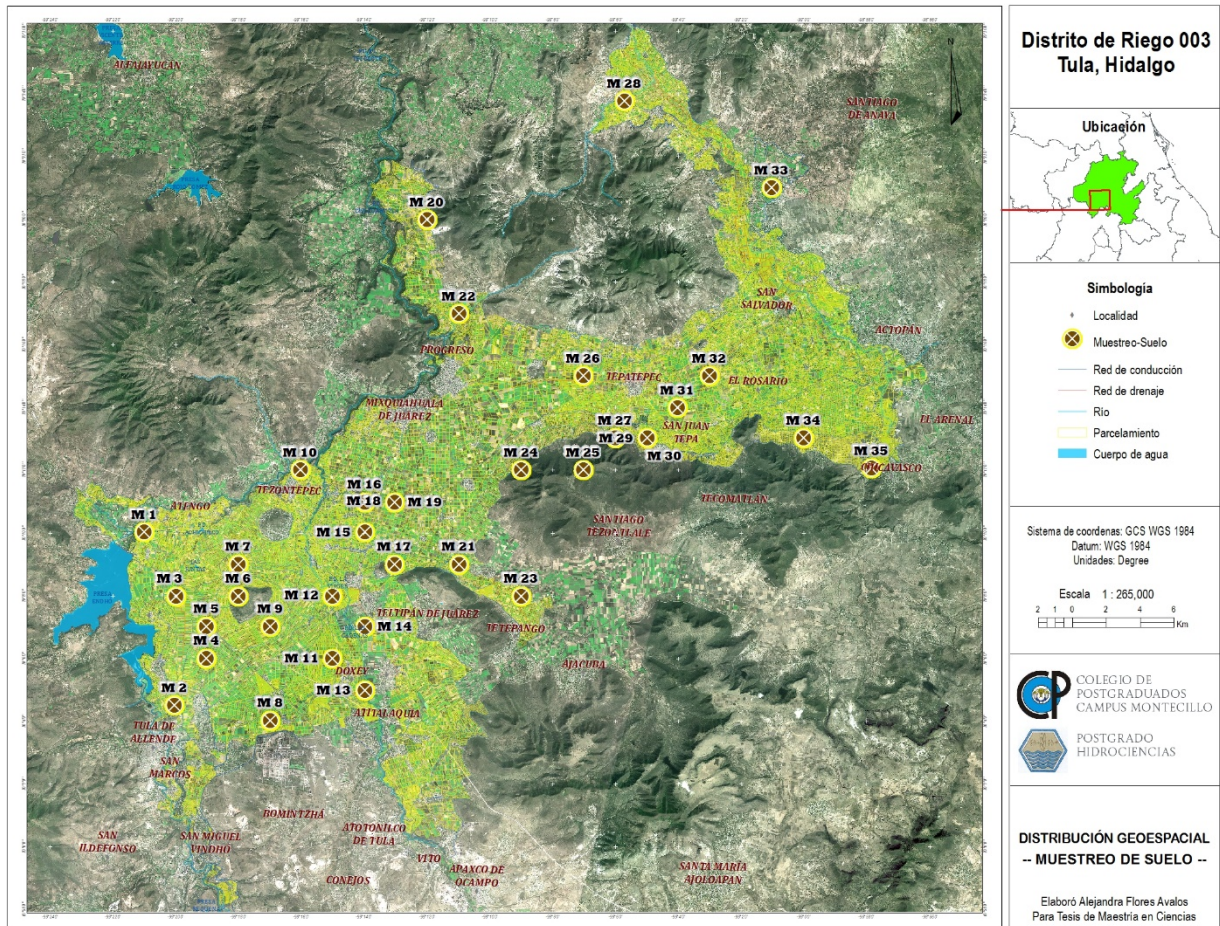


Figura 11 Ubicación de Muestreo de Suelo

Una vez colectadas las muestras de suelo fueron secadas al aire y a la sombra. Posteriormente se molieron con mazos de madera hasta pasar el material a través de un tamiz de 2 mm de abertura. Los análisis químicos y físicos de cada una de las muestras de suelo colectadas se efectuaron en el Laboratorio de Ciencias Ambientales del COLMERN, las cuales se indican a continuación:

- Variables empleadas para la caracterización del suelo
 - Textura (Contenido de arena, limo y arcilla)
 - Densidad aparente
 - Saturación del suelo
 - Capacidad de campo
 - Punto de marchitamiento permanente

- pH (relación 2:1 agua:suelo)
- Conductividad eléctrica (relación 2:1 agua:suelo)
- Materia orgánica total
- Sumatoria de bases intercambiables (índice de segundo grado)
- Contenido nutrimental del suelo
 - Nitrógeno inorgánico (amonio)
 - Nitrógeno inorgánico (nitrato)
 - Fósforo Olsen
 - Hierro
 - Manganeso
 - Zinc
 - Cobre
- Elementos potencialmente tóxicos
 - Plomo
 - Cadmio
 - Níquel
 - Cromo
 - Arsénico
- Presencia de sales en la solución del suelo
 - pH en el extracto de la pasta saturada
 - Conductividad eléctrica en el extracto de la pasta saturada
 - Sodio
 - Calcio
 - Magnesio
 - Potasio
 - Carbonato
 - Bicarbonato
 - Sulfato
 - Cloruro
 - Boro
 - Fósforo

Los procedimientos seguidos para el análisis de las muestras de suelo se realizaron con base en la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, cadmio, cromo, níquel y plomo, así como en la norma NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

7. 3. Muestreo y análisis del tejido vegetal

La planificación del muestreo del tejido vegetal se realizó con los mismos criterios seguidos para la colecta del suelo, esto es, se hizo recopilación, análisis de la información disponible de la región y recorridos de campo preliminares durante mayo y junio de 2013. A partir de los resultados obtenidos se identificó la ruta a seguir para colectar zonas representativas del área de estudio con el propósito de conocer las condiciones actuales, prácticas habituales de manejo, prever los medios pertinentes para protección de la salud del personal involucrado en el estudio y preservación de las muestras, eligiendo sólo praderas de alfalfa con base en dos criterios: a) es el cultivo más extendido en toda la región en estudio; b) el maíz, segunda especie en importancia por el área cultivada, estaba en diferentes estadios fenológicos, condición que debe considerarse en la interpretación de los resultados, por las distintas tasas de absorción y acumulación de elementos tanto de nutrientes como tóxicos.

Se hizo coincidir en prácticamente todos los casos la selección de los sitios definitivos de colecta del tejido vegetal con los definidos para el muestreo de suelos. El procedimiento para colectar el tejido vegetal fue el siguiente:

- Para cada muestra simple de suelo le correspondió una de planta considerando una superficie de 50 x 50 cm. Con una pinza se cortaron los tallos de la alfalfa al ras del suelo;
- Cinco muestras simples se colocaron en la misma bolsa de papel de estraza para formar la muestra compuesta correspondiente a cada parcela seleccionada.

- Cada muestra se identificó con base en las coordenadas del sitio (longitud, latitud y altitud), codificando esta información en la libreta de campo así como en la bolsa de papel de estraza correspondiente.

La ubicación de cada uno de los sitios seleccionados para la colecta de muestras de material vegetal se presenta en la Figura 12.

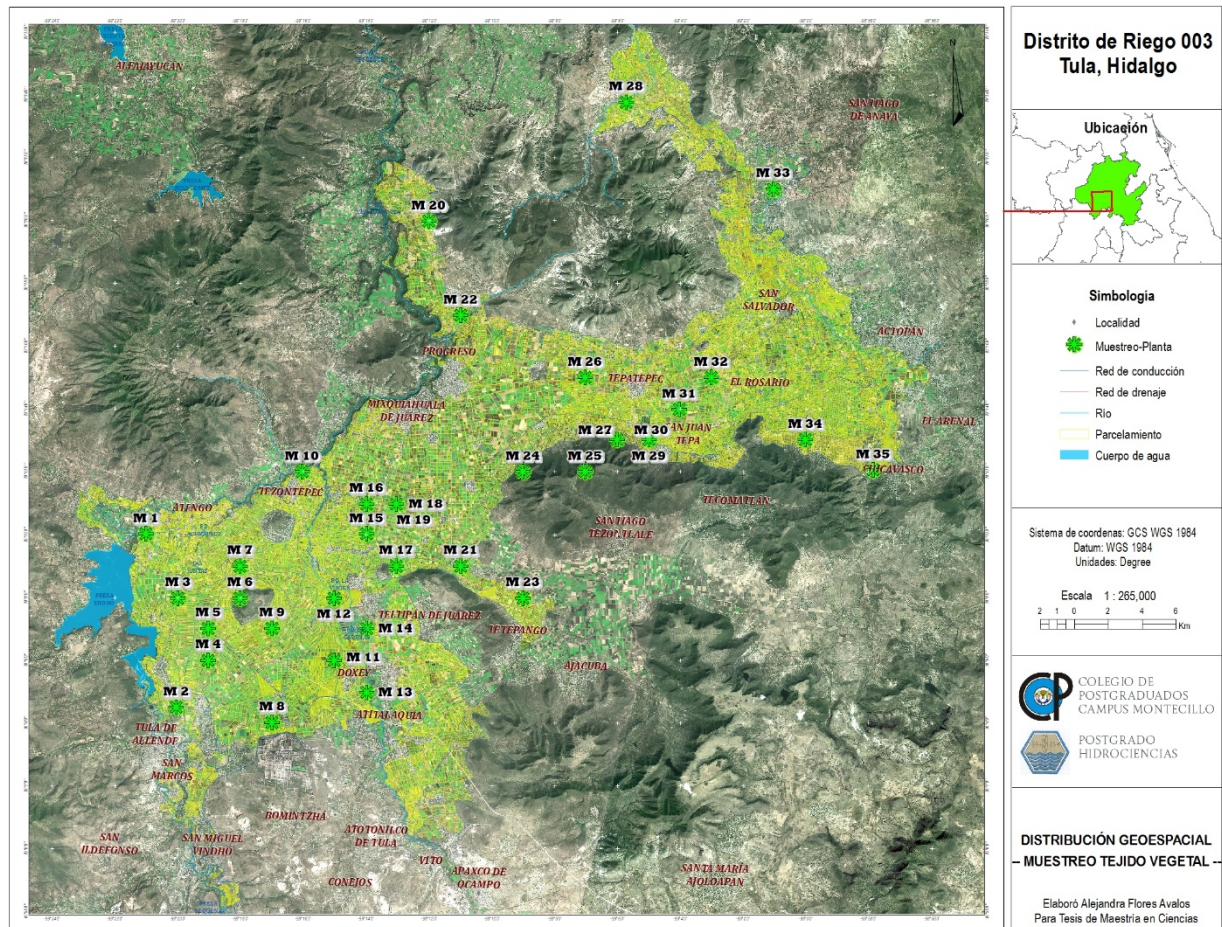


Figura 12 Ubicación de Muestreo de Planta

Las muestras de planta se transportaron hacia el laboratorio el mismo día de su colecta y ahí se procedió a su tratamiento previo al análisis, donde se lavó el tejido con agua destilada para remover los residuos de polvo y tierra que pudiesen contener, con la finalidad de que no se contaminaran ni alteran los resultados. Posterior a ello se introdujeron en bolsas limpias de papel de estraza perforadas previamente identificadas y se colocaron en un horno con circulación forzada de aire a 65°C hasta alcanzar un peso

constante, el cual se alcanzó en un máximo de tres días. Una vez secas las muestras se homogeneizaron, molieron y tamizaron a través de un molino especializado. Cabe aclarar que el propósito del secado es impedir que se lleven a cabo reacciones químicas y/o biológicas indeseables en las muestras, mientras que el de la molienda es obtener un tamaño de partícula específico para estandarizar los procedimientos de acuerdo a las normas establecidas para el análisis.

<i>Contenido de macro-nutrientes en el tejido vegetal</i>	<i>Contenido de micro-nutrientes en el tejido vegetal</i>	<i>Contenido de elementos potencialmente tóxicos en el tejido vegetal</i>
<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Nitrógeno</i> ○ <i>Fósforo</i> ○ <i>Potasio</i> ○ <i>Calcio</i> ○ <i>Magnesio</i> ○ <i>Azufre</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Hierro</i> ○ <i>Cobre</i> ○ <i>Manganeso</i> ○ <i>Zinc</i> ○ <i>Boro</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Nitrato</i> ○ <i>Sodio</i> ○ <i>Arsénico</i> ○ <i>Cadmio</i> ○ <i>Plomo</i> ○ <i>Cromo</i> ○ <i>Níquel</i>

El análisis de las muestras vegetales consistió en la extracción total de los elementos acumulados en el tejido mediante digestión húmeda. El resultado del análisis indica los nutrimentos y elementos potencialmente tóxicos absorbidos por el cultivo al momento de la colecta de la muestra.

VIII. Resultados y Análisis

8. 1. Calidad del agua

El agua residual que llega al Valle del Mezquital proveniente principalmente del drenaje de la Cuenca del Valle de México, incluye agua de desecho de zonas habitacionales y de zonas industriales. La composición de dicha agua residual incluye elementos tóxicos nocivos para el ambiente y la salud de los seres vivos.

Las aguas residuales también se denominan servidas, fecales, cloacales o negras (por su coloración) y a través del análisis de sus componentes se define la calidad de la misma según el uso que se le pretende dar, así como las propiedades que posee y su posible interacción con las instalaciones o vías de conducción.

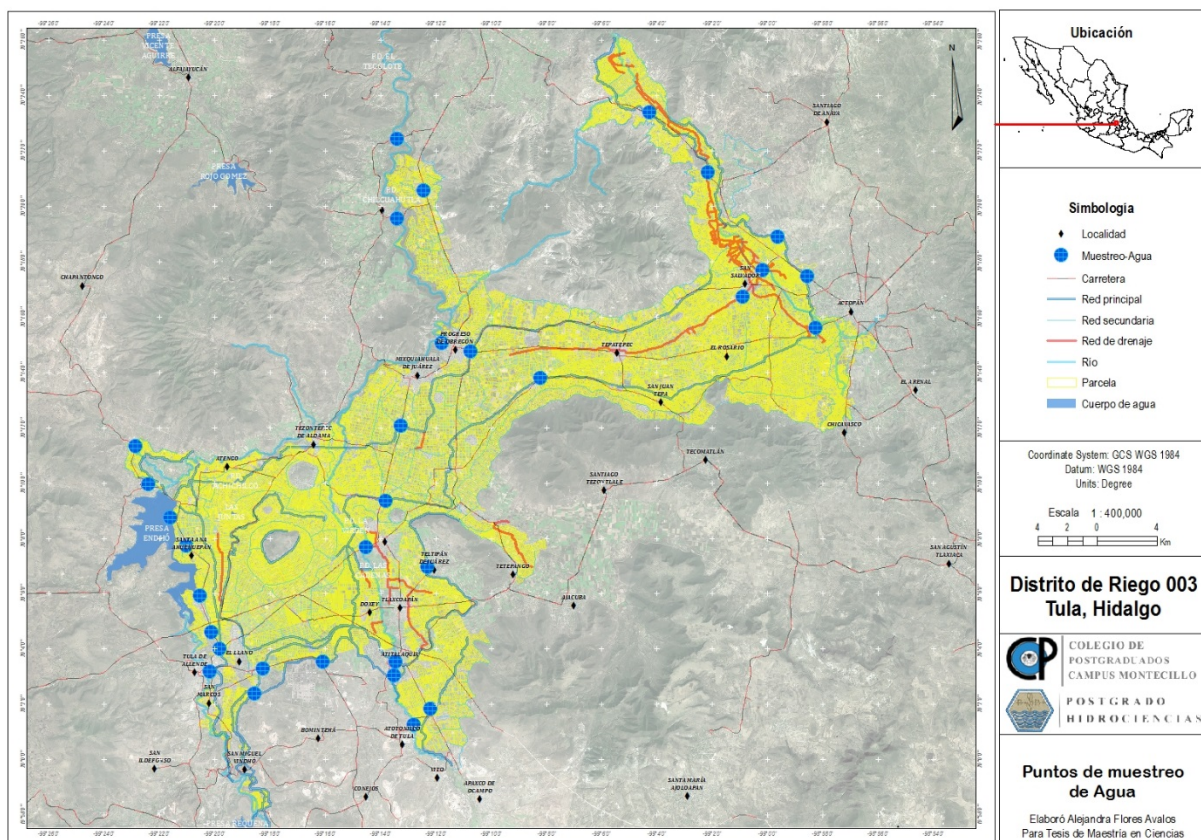


Figura 13 Ubicación de los sitios de muestro de agua dentro del DR003-Tula

Debido a que el interés en la región en estudio es el uso de las aguas residuales con fines de riego, y en apego al objetivo del presente estudio los parámetros que se reportan son de tres tipos:

- 1) Variables asociadas a la calidad del agua de riego y su efecto sobre el suelo y los cultivos
- 2) Indicadores del efecto de la calidad del agua sobre su conducción e infraestructura
- 3) Indicadores que están definidos por la normatividad mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996) que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

8.1.1. Calidad química del agua residual para el riego agrícola

Concentración de las especies iónicas (catión-anión)

En el Cuadro 8 se presenta la concentración de las especies iónicas (cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ ; y aniones CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) analizadas en las muestras de agua que se colectaron en el DR003-Tula.

Cuadro 8 Concentración de las especies iónicas (cationes y aniones) analizadas para evaluar la calidad para fines de irrigación en las muestras de agua

Muestra	Cationes					Aniones				
	Ca^{2+} meq/L	Mg^{2+} meq/L	K^+ meq/L	Na^+ meq/L	Suma Cationes meq/L	CO_3^{2-} meq/L	HCO_3^- meq/L	Cl^- meq/L	SO_4^{2-} meq/L	Suma Aniones meq/L
01TU	3.50	1.65	0.51	10.92	16.57	-	8.10	4.32	0.98	13.39
02TU	4.83	2.96	0.51	8.39	16.70	-	5.01	3.61	5.06	13.68
03TU	5.75	5.02	0.59	15.79	27.15	-	11.49	6.15	4.60	22.24
04TU	5.47	2.06	0.36	9.48	17.37	-	7.01	4.63	3.96	15.60
05TU	3.70	1.89	0.61	11.61	17.82	-	7.64	5.70	1.27	14.61
06TU	3.50	2.39	0.84	8.22	14.95	-	6.69	3.92	2.91	13.52
07TU	3.80	2.30	0.43	11.31	17.85	-	8.85	4.74	2.17	15.75
08TU	7.69	6.42	1.00	20.31	35.42	-	12.45	6.77	9.85	29.07
09TU	7.20	7.41	0.49	23.31	38.40	-	15.14	9.06	7.87	32.07
10TU	5.64	2.80	0.20	8.48	17.12	-	5.41	2.34	6.93	14.68
11TU	4.20	3.29	0.41	10.61	18.51	-	7.80	4.60	3.10	15.50
12TU	4.90	2.88	0.66	9.66	18.10	-	6.59	5.56	4.41	16.56
13TU	4.18	3.29	0.56	8.18	16.21	-	6.78	4.37	3.19	14.34
14TU	3.82	2.47	0.54	10.61	17.44	-	8.72	4.71	2.08	15.51
15TU	4.16	2.63	0.54	8.92	16.24	-	8.18	4.71	1.12	14.01
16TU	5.05	3.70	0.72	11.40	20.87	-	8.98	5.50	4.50	18.98
17TU	5.10	5.51	0.69	10.87	22.18	-	8.72	5.44	5.27	19.43
18TU	4.67	1.81	0.33	4.78	11.60	-	3.98	2.20	2.14	8.33

Muestra	Cationes					Aniones				
	Ca ²⁺ meq/L	Mg ²⁺ meq/L	K ⁺ meq/L	Na ⁺ meq/L	Suma Cationes meq/L	CO ₃ ²⁻ meq/L	HCO ₃ ⁻ meq/L	Cl ⁻ meq/L	SO ₄ ²⁻ meq/L	Suma Aniones meq/L
19TU	6.40	4.36	0.49	16.09	27.34	-	11.05	7.48	5.29	23.81
20TU	3.42	1.73	0.36	9.00	14.51	-	7.10	3.84	0.87	11.81
21TU	3.57	2.55	0.38	5.74	12.24	-	2.61	2.71	3.79	9.10
22TU	4.28	2.80	0.51	15.79	23.38	-	10.87	7.14	3.48	21.48
23TU	4.97	3.79	0.54	10.79	20.08	0.37	7.19	5.92	5.83	19.31
24TU	4.32	2.14	0.33	4.78	11.57	-	4.36	2.76	2.17	9.29
25TU	4.55	4.53	0.51	9.87	19.46	-	7.05	4.32	5.16	16.53
26TU	5.39	3.46	0.46	14.27	23.57	-	7.82	7.45	5.06	20.32
27TU	5.82	3.29	0.49	13.35	22.95	-	7.78	7.33	5.91	21.03
28TU	6.03	4.03	0.69	12.53	23.28	-	8.83	7.08	4.79	20.70
29TU	5.37	5.10	0.43	11.79	22.69	-	8.73	6.85	5.10	20.69
30TU	5.20	7.08	0.38	13.01	25.67	-	9.57	7.70	4.56	21.83
31TU	4.34	3.54	0.51	8.96	17.35	-	7.18	4.82	2.21	14.21
32TU	4.35	3.37	0.54	8.87	17.13	-	6.80	5.05	3.21	15.06

Fuente: Elaboración propia

Los compuestos iónicos al disolverse en el medio acuoso se disocian en forma de iones y este es el caso de minerales, sales, fertilizantes, materiales orgánicos, entre otros y con base en el principio de la electro-neutralidad, la carga total de la solución acuosa tiene que ser cero, en otras palabras, el número de las cargas positivas es igual al de las cargas negativas. El balance catiónico-aniónico se calcula comparando la carga eléctrica total de los cationes con la de los aniones a través del número de equivalentes entre ambas especies iónicas.

Como el agua siempre está balanceada, es necesario revisar el balance catiónico-aniónico para comprobar y validar el resultado de los análisis. Cuando esto es preciso, la comparación entre la suma de miliequivalentes (meq) de cationes y la de los aniones es casi igual, cuando esto no ocurre, la diferencia es superior a un determinado valor lo que implica que hubo algún inconveniente en el proceso de análisis químico. En la Figura 14 se presenta la tendencia entre aniones y cationes, así como su relación cuantitativa de las muestras de agua colectadas en el DR003-Tula. Donde la relación de los iones es de 97%, lo cual resulta ser un dato satisfactorio, e indica que se puede realizar un análisis de los iones con base en el margen de error entre la relación de la sumatoria de cationes y aniones.

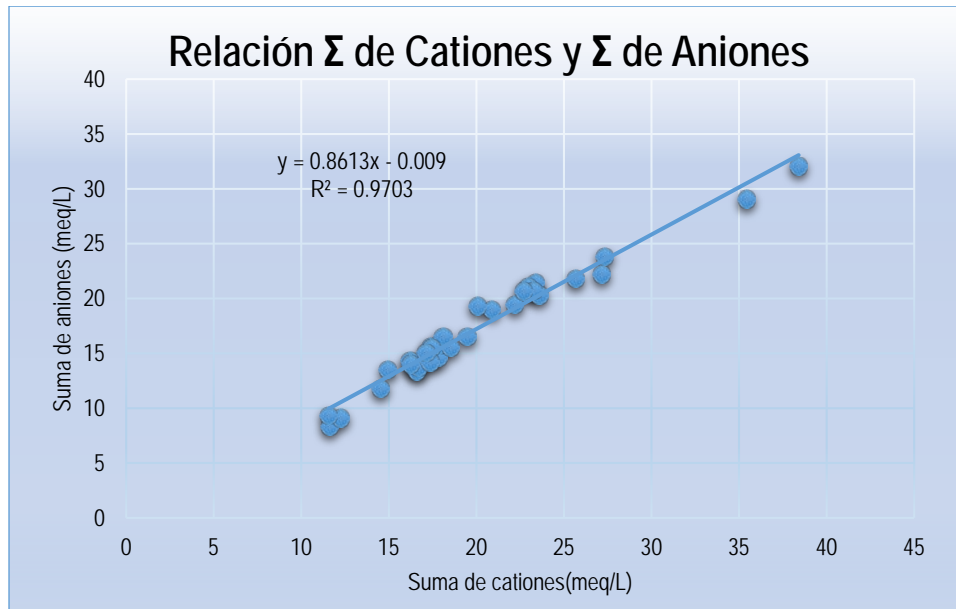


Figura 14 Tendencia de la relación cuantitativa entre la sumatoria de aniones y la sumatoria de cationes

El promedio de la diferencia entre la sumatoria de ambas especies iónicas fue de 7.74%. Cabe mencionar que el porcentaje de tolerancia que indica la diferencia en el balance entre aniones y cationes depende de la referencia consultada, variando de 5% a 20%, en consideración las diferencias podrían estar dadas por elementos que no se hubiesen considerado en el análisis del agua y que esto altere el resultado, por lo que dichas diferencias no significan que esté mal realizado el trabajo de laboratorio, sobre todo cuando se trata de aguas residuales.

Los resultados de esta evaluación muestran que sólo el 18.75% del total de los muestreos está por debajo del 5% de tolerancia para el balance de aniones y cationes, y que los porcentajes de diferencia fluctuaron entre 5 y 16 % (Cuadro 9). En el presente estudio posiblemente hubo algún error al momento de realizar la titulación, ya que es muy difícil determinar el punto exacto del vire y la intervención de otro elemento que hace que en algunos casos las lecturas no sean las reales.

Cuadro 9 Margen de error en la suma de aniones y cationes

Muestra	Suma Aniones meq/L	Suma Cationes meq/L	Error %
01TULA	13.39	16.57	10.62
02TULA	13.68	16.70	9.92
03TULA	22.24	27.15	9.95
04TULA	15.60	17.37	5.39
05TULA	14.61	17.82	9.91
06TULA	13.52	14.95	5.01
07TULA	15.75	17.85	6.23
08TULA	29.07	35.42	9.85
09TULA	32.07	38.40	8.99
10TULA	14.68	17.12	7.67
11TULA	15.50	18.51	8.85
12TULA	16.56	18.10	4.45
13TULA	14.34	16.21	6.11
14TULA	15.51	17.44	5.84
15TULA	14.01	16.24	7.38
16TULA	18.98	20.87	4.74
17TULA	19.43	22.18	6.61
18TULA	8.33	11.60	16.42
19TULA	23.81	27.34	6.90
20TULA	11.81	14.51	10.27
21TULA	9.10	12.24	14.72
22TULA	21.48	23.38	4.23
23TULA	19.31	20.08	1.94
24TULA	9.29	11.57	10.95
25TULA	16.53	19.46	8.15
26TULA	20.32	23.57	7.40
27TULA	21.03	22.95	4.36
28TULA	20.70	23.28	5.86
29TULA	20.69	22.69	4.62
30TULA	21.83	25.67	8.08
31TULA	14.21	17.35	9.95
32TULA	15.06	17.13	6.45

Promedio 7.74

Fuente: Elaboración propia

Otra prueba que se hace es la relación cuantitativa entre el valor de la conductividad eléctrica (CE) del agua y la sumatoria de la concentración de cationes en las muestras analizadas, la cual se presenta en la Figura 15.

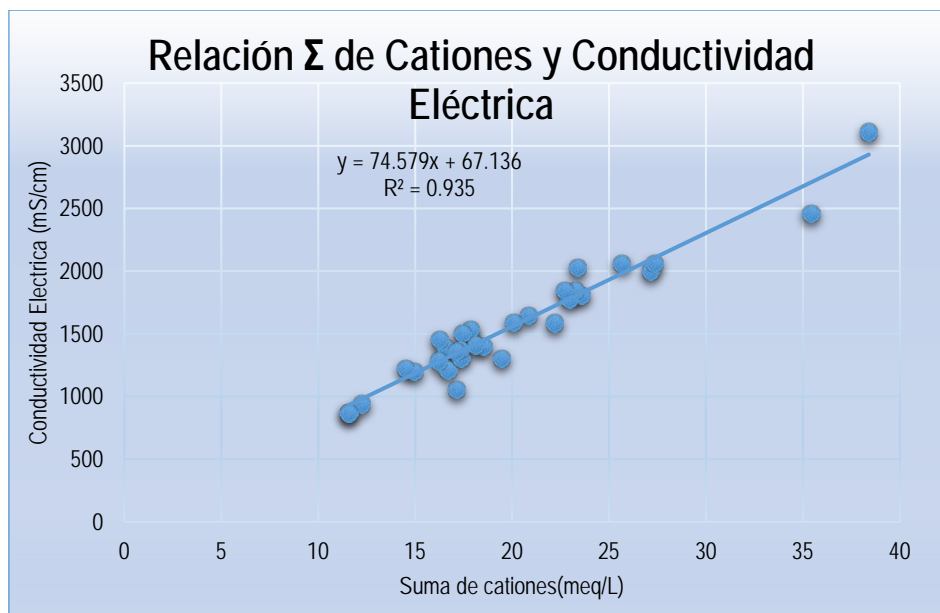


Figura 15 Tendencia de la relación cuantitativa entre la conductividad eléctrica y la sumatoria de cationes

Si se considera la función $CE=f(\Sigma \text{ cationes})$, se espera que la pendiente que describe la relación entre ambas variables fluctúe entre 80 y 110. En el presente estudio la ordenada al origen es de 93, lo que indica que está dentro del intervalo apropiado y la determinación de los cationes es confiable.

pH, Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales

El agua conduce la electricidad en forma proporcional a su contenido total de sales disueltas en ella, por lo cual se emplea la conductividad eléctrica para medir su salinidad y se expresa en dS/m o mS/cm. En la Figura 16 se presenta la distribución de los valores de conductividad eléctrica, temperatura, pH, y sólidos disueltos totales de las muestras de agua colectadas y analizadas.

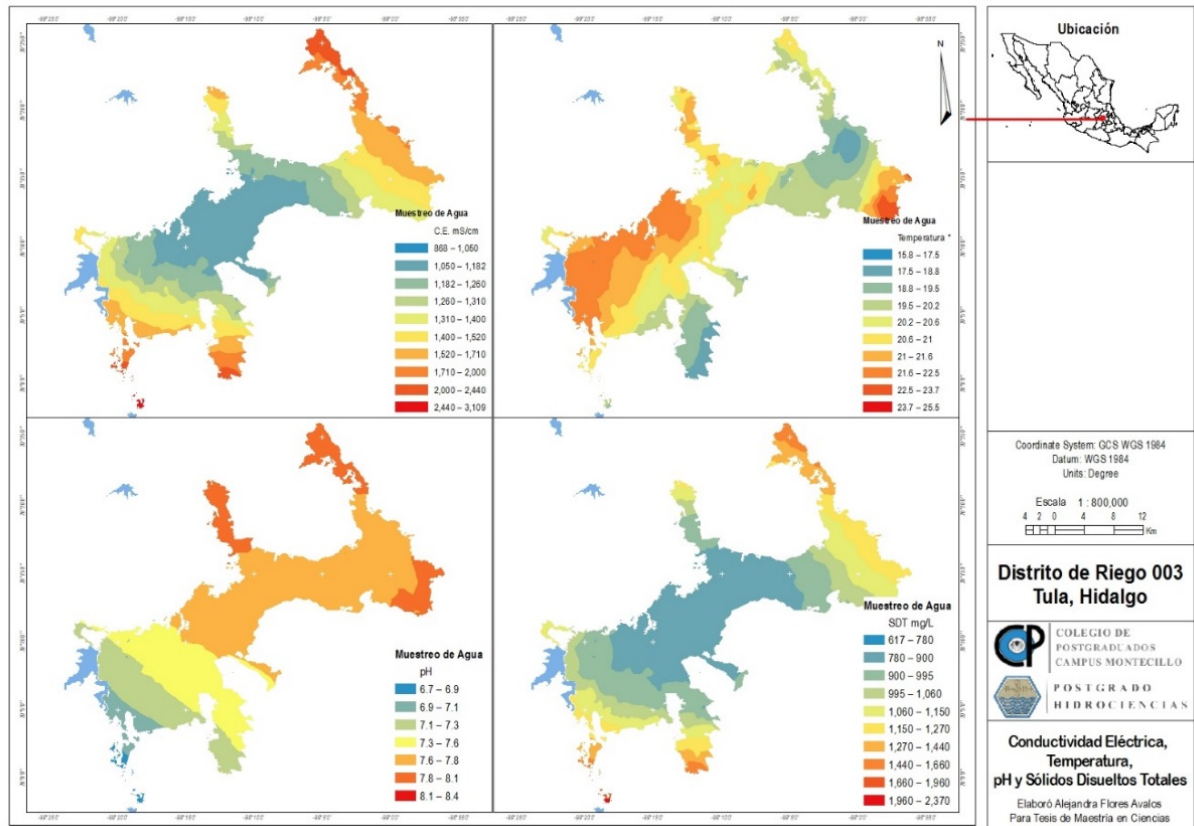


Figura 16 Distribución de los valores de conductividad eléctrica (CE), temperatura del agua (T), pH, y sólidos disueltos totales (SDT) del muestreo de agua

Hay diversos criterios sobre el valor que debe tener el pH del agua, entre ellos Ayers y Westcot, publicaron en la FAO en 1994, como normal el rango de 6.5 a 8.4, pero no hay un valor que se pudiese considerar como óptimo en términos generales; si se consideran las reacciones químicas de los elementos, mientras el valor de pH sea mucho menor o mayor a 7 más intensa será la acidez o la alcalinidad y con ello la formación de compuestos que afecten la circulación de dichos elementos en las líneas de conducción por la formación de precipitados. Los datos encontrados en los análisis fluctúan en el rango normal antes mencionado.

La cantidad total de sólidos disueltos (SDT) en el agua suele expresarse en ppm (partes por millón) o en mg/L y tiene una relación estrecha con la conductividad eléctrica, la cual refleja la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica. La relación entre ambas variables se presenta en la Figura 17.

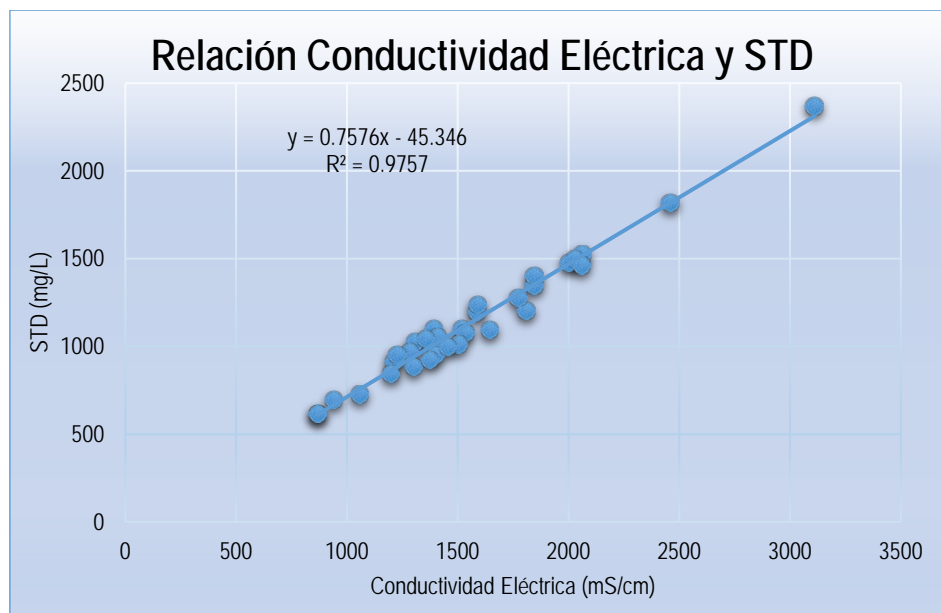


Figura 17 Tendencia de la relación cuantitativa entre la conductividad eléctrica y el total de sólidos disueltos

El valor de la pendiente que relaciona la tendencia de la conductividad eléctrica respecto a la concentración de sólidos disueltos totales en el agua es de 0.7576, lo cual se asocia a análisis de aguas residuales. De hecho según los indicadores de FAO, 1994, este valor que se define como constante de proporcionalidad, suele ser de 0.64 para aguas no contaminadas, pero en este caso a pesar de ello está dentro de los límites para ser considerado como de bajo riesgo de salinización.

De acuerdo a los grados de restricción de uso de la FAO con respecto a C.E. y SDT sólo una muestra de agua presentó grado severo, mientras que las demás indican que su restricción de uso es de leve a moderado.

Cuadro 10 Resultados obtenidos de Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales para las muestras de agua analizadas

Muestra	Temp °	pH	CE mS/cm	SDT mg/L
01TULA	20.80	7.30	1,392	1,102
02TULA	18.80	7.40	1,211	914
03TULA	24.30	6.70	2,000	1,478
04TULA	21.70	7.20	1,307	1,025
05TULA	22.20	7.10	1,518	1,101
06TULA	19.50	6.90	1,199	843
07TULA	22.60	7.00	1,534	1,078

Muestra	Temp °	pH	CE mS/cm	SDT mg/L
08TULA	25.20	7.30	2,458	1,819
09TULA	21.30	6.90	3,109	2,370
10TULA	18.50	7.00	1,058	728
11TULA	20.30	6.70	1,400	953
12TULA	20.10	7.70	1,410	1,054
13TULA	21.10	7.70	1,283	968
14TULA	19.60	7.10	1,505	1,013
15TULA	19.30	7.20	1,453	1,000
16TULA	20.80	8.40	1,645	1,096
17TULA	20.60	8.20	1,586	1,197
18TULA	25.50	7.60	868	617
19TULA	20.10	7.50	2,061	1,525
20TULA	22.00	7.10	1,226	953
21TULA	20.00	7.50	940	695
22TULA	19.80	7.10	2,026	1,499
23TULA	17.30	8.40	1,591	1,236
24TULA	21.30	7.40	868	617
25TULA	22.00	7.60	1,302	886
26TULA	20.10	8.00	1,808	1,204
27TULA	21.30	7.90	1,772	1,280
28TULA	17.10	7.50	1,844	1,349
29TULA	15.80	7.50	1,844	1,405
30TULA	19.50	7.80	2,060	1,463
31TULA	21.00	8.00	1,374	925
32TULA	23.50	8.00	1,356	1,044

Fuente: Elaboración propia

Variables calculadas como índices de segundo grado: Relación de adsorción de sodio (RAS), carbonato de sodio residual (CSR)

El índice derivado de las concentraciones de los cationes en estado soluble e intercambiable, en el caso del calcio y sodio es útil para medir la solidificación que presenta el agua de riego, y tiene relación con el porcentaje del sodio intercambiable (PSI) de un suelo. A mayor relación de adsorción de sodio (RAS) aumenta la posibilidad de que un suelo se vuelva sódico, por la precipitación de cationes menos movibles, como Ca y Mg.

En función del valor de RAS las aguas se clasifican conforme a lo siguiente.

Cuadro 11 Clasificación del agua de riego en función del valor de RAS

Clasificación	Valores de RAS	
S1	<10	Aguas bajas en sodio
S2	10.0-18.0	Aguas medias en sodio
S3	18.0-26.0	Aguas altas en sodio
S4	>26	Aguas muy altas en sodio

El concepto de Carbonato de Sodio Residual (CSR) tiene en cuenta las concentraciones de los aniones carbonato y bicarbonato, y de los cationes calcio y magnesio. Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el de calcio más magnesio, existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio debido a que su alta solubilidad puede permanecer en solución, aún después que se han precipitado los carbonatos de calcio y magnesio. En estas condiciones, la concentración total y relativa de sodio puede ser suficiente para desplazar al calcio y magnesio del complejo de intercambio, produciéndose la defloculación del suelo. Por lo que la clasificación para aguas de riego es la siguiente:

Cuadro 12 Clasificación del agua de riego en función del CSR

Clase	Valores de CSR
Buena	< 1.25
Condicionada	1.25 – 2.50
No recomendable	>4.0

Con base en la Relación de Adsorción de Sodio y el Carbonato de Sodio Residual las muestras de agua fueron clasificadas de la siguiente manera y presentadas en el Cuadro 13.

Cuadro 13 Clasificación de la calidad de las aguas con base en la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y el Carbonato de Sodio Residual (CSR)

Muestra	Ca meq/l	Mg meq/l	Na meq/l	RAS	Clasificación RAS	CSR	Clasificación CSR
01TULA	3.50	1.65	10.92	6.81	Bajo en Sodio	3.00	Condicionada
02TULA	4.83	2.96	8.39	4.25	Bajo en Sodio	-2.70	Buena
03TULA	5.75	5.02	15.79	6.80	Bajo en Sodio	0.70	Buena
04TULA	5.47	2.06	9.48	4.89	Bajo en Sodio	-0.50	Buena
05TULA	3.70	1.89	11.61	6.95	Bajo en Sodio	2.00	Condicionada
06TULA	3.50	2.39	8.22	4.79	Bajo en Sodio	0.80	Buena
07TULA	3.80	2.30	11.31	6.47	Bajo en Sodio	2.80	Condicionada

Muestra	Ca meq/l	Mg meq/l	Na meq/l	RAS	Clasificación RAS	CSR	Clasificación CSR
08TULA	7.69	6.42	20.31	7.65	Bajo en Sodio	-1.70	Buena
09TULA	7.20	7.41	23.31	8.63	Bajo en Sodio	0.50	Buena
10TULA	5.64	2.80	8.48	4.13	Bajo en Sodio	-3.00	Buena
11TULA	4.20	3.29	10.61	5.48	Bajo en Sodio	0.30	Buena
12TULA	4.90	2.88	9.66	4.90	Bajo en Sodio	-1.20	Buena
13TULA	4.18	3.29	8.18	4.23	Bajo en Sodio	-0.70	Buena
14TULA	3.82	2.47	10.61	5.99	Bajo en Sodio	2.50	Condicionada
15TULA	4.16	2.63	8.92	4.84	Bajo en Sodio	1.40	Condicionada
16TULA	5.05	3.70	11.40	5.45	Bajo en Sodio	0.20	Buena
17TULA	5.10	5.51	10.87	4.72	Bajo en Sodio	-1.90	Buena
18TULA	4.67	1.81	4.78	2.66	Bajo en Sodio	-2.50	Buena
19TULA	6.40	4.36	16.09	6.94	Bajo en Sodio	0.30	Buena
20TULA	3.42	1.73	9.00	5.61	Bajo en Sodio	2.00	Condicionada
21TULA	3.57	2.55	5.74	3.28	Bajo en Sodio	-3.50	Buena
22TULA	4.28	2.80	15.79	8.40	Bajo en Sodio	3.80	Condicionada
23TULA	4.97	3.79	10.79	5.16	Bajo en Sodio	-1.20	Buena
24TULA	4.32	2.14	4.78	2.66	Bajo en Sodio	-2.10	Buena
25TULA	4.55	4.53	9.87	4.64	Bajo en Sodio	-2.00	Buena
26TULA	5.39	3.46	14.27	6.78	Bajo en Sodio	-1.00	Buena
27TULA	5.82	3.29	13.35	6.26	Bajo en Sodio	-1.30	Buena
28TULA	6.03	4.03	12.53	5.59	Bajo en Sodio	-1.20	Buena
29TULA	5.37	5.10	11.79	5.15	Bajo en Sodio	-1.80	Buena
30TULA	5.20	7.08	13.01	5.25	Bajo en Sodio	-2.70	Buena
31TULA	4.34	3.54	8.96	4.52	Bajo en Sodio	-0.70	Buena
32TULA	4.35	3.37	8.87	4.52	Bajo en Sodio	-0.90	Buena

Fuente: *Elaboración propia*

Los resultados del RAS indican que las aguas tienen bajo contenido de sodio (*Bajo en Sodio*), por lo que su aplicación no causará problemas de sodificación edáfica. Los valores del CSR revelan que el 78% son de clase Buena; y el 22% de las aguas muestreadas se encuentran en categoría Condicionada por lo que su uso para riego puede ocasionar que los suelos se endurezcan y compacten al secarse.

8.1.2. Indicadores de la calidad del agua respecto a su efecto sobre su conducción e infraestructura

Dureza del agua y Alcalinidad

El grado de **dureza** del agua de riego (blanda, normal y dura) depende de la concentración de calcio y magnesio. Y debido a que la concentración de estos es

normalmente mucho mayor que la del resto de iones alcalinotérreos, la dureza es prácticamente igual a las suma de las concentraciones de los dos iones mencionados.

El agua con menos de 60 mg/L de CaCO₃ se considera blanda, pero aquella con más de 270 mg/L CaCO₃ se considera dura.

El agua también puede clasificarse en función de los Grados Hidrométricos Franceses (°F) conforme a la-siguiente tabla:

Cuadro 14 Clasificación del agua de riego en función de los Grados Hidrométricos Franceses

<i>Tipo de agua</i>	<i>Grados Hidrométricos Franceses (°F)</i>
<i>Muy dulce</i>	<i>< 7</i>
<i>Dulce</i>	<i>7 – 14</i>
<i>Medianamente dulce</i>	<i>14 – 22</i>
<i>Medianamente dura</i>	<i>22 – 32</i>
<i>Dura</i>	<i>32 – 54</i>
<i>Muy Dura</i>	<i>>54</i>

De acuerdo con el contenido de CaCO₃ el agua de la mayoría de las muestras es dura porque rebasan los 270 mg/L de CaCO₃ y sólo dos muestras presentaron valores de 256 y 257 mg/L; en función de los grados hidrométricos franceses el agua muestreada es de tipo medianamente dura (65% de las muestras), dura (25%) y muy dura (9.4%), los resultados se muestran en el Cuadro 15.

Cuadro 15 Dureza del agua calculada con varios criterios: Dureza por CaCO₃; Dureza por grados hidrométricos franceses; Alcalinidad

Muestra	Dureza por CaCO ₃ mg/L CaCO ₃	Dureza por Grados Hidrométricos Franceses °f	Alcalinidad mg/L CaCO ₃
01TULA	256	26	405
02TULA	388	39	251
03TULA	539	54	575
04TULA	376	38	351
05TULA	281	28	382
06TULA	294	29	335
07TULA	305	30	443
08TULA	705	71	623
09TULA	730	73	758
10TULA	420	42	270
11TULA	374	37	390
12TULA	387	39	330
13TULA	372	37	340
14TULA	312	31	436
15TULA	440	34	409
16TULA	437	44	449
17TULA	530	53	436

	Muestra	Dureza por CaCO ₃	Dureza por Grados Hidrométricos Franceses	Alcalinidad
		mg/L CaCO ₃	°f	mg/L CaCO ₃
	18TULA	325	32	199
	19TULA	538	54	553
	20TULA	257	26	355
	21TULA	304	30	130
	22TULA	354	35	544
	23TULA	439	44	378
	24TULA	322	32	218
	25TULA	454	45	353
	26TULA	441	44	391
	27TULA	455	46	390
	28TULA	501	50	442
	29TULA	525	52	437
	30TULA	614	61	479
	31TULA	392	39	359
	32TULA	386	39	340
Clasificación	Blanda	6.25%		
	Medianamente dura		65.6%	
	Dura	93.75%	25.0%	Media alcalinidad 3.13%
	Muy dura		9.4%	Alta alcalinidad 96.87%

Fuente: *Elaboración propia*

La capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones es la **alcalinidad** y esta representa la suma de las bases que pueden ser tituladas en una muestra de agua. Dado que la alcalinidad de aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, esta se toma como un indicador de dichas especies iónicas. No obstante, algunas sales de ácidos débiles como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos pueden también contribuir a la alcalinidad de estar también presentes. Estos iones negativos en solución están comúnmente asociados o pareados con iones positivos de calcio, magnesio, potasio, sodio y otros cationes. El bicarbonato constituye la forma química de mayor contribución a la alcalinidad. Dicha especie iónica y el hidróxido son particularmente importantes cuando hay gran actividad fotosintética de algas o cuando hay descargas industriales en un cuerpo de agua.

Históricamente, la alcalinidad ha sido utilizada como un indicador de la productividad de lagos, donde niveles de alcalinidad altos indicarían una productividad alta y viceversa. Los Rangos de alcalinidad se presentan a continuación:

Cuadro 16 Nivel de alcalinidad

Rango	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)
Baja	< 75
Media	75 – 150
Alta	Alta >150

Casi el 100% de las muestras del presente estudio tienen Alta Alcalinidad salvo una muestra que se clasifica como de Media Alcalinidad. Dichos resultados se pueden considerar normales ya que las muestras analizadas corresponden a aguas residuales.

Índice de corrosión o incrustación (criterios: IL=Langelier simplificado; RSI=índice de Ryznar; LSI=índice de saturación; PSI=índice de Puckorius; LAI=índice de Larson-Skold)

Es común asociar las incrustaciones (en las tuberías) al calcio presente en el agua, pero dichas formaciones están constituidas por sales de calcio y magnesio. Cuando en el agua además están presentes los iones bicarbonato en cantidades abundantes, también se propician las incrustaciones calcáreas, incrementando este efecto por las condiciones de pH alcalino porque favorecen la formación de cal.

El Índice de Langellier, el cual puede predecir problemas de precipitación por carbonato cálcico (incrustaciones), es la diferencia entre el pH del agua y el pH calculado. Cuando dicho índice presenta valores positivos el agua está sobresaturada con carbonato de calcio y será susceptible de formar incrustaciones. En el presente estudio 72% de muestras tienen índices negativos, lo que sugiere que el carbonato cálcico se mantiene en disolución y será corrosiva para el acero en presencia de oxígeno; y sólo el 28% de las muestras indican que el agua residual no causará problemas por incrustación. Este índice es más útil para predecir tendencias corrosivas o compuestos formadores de incrustaciones en un sistema a gran escala tal como un embalse o instalación de tratamiento de agua

El Índice Ryznar es una modificación del de Langelier, basado en estudios de las condiciones de incrustación y corrosión realizados en diversos distritos municipales. En el Índice Ryznar, donde $RSI = 2pH_s - pH$, los valores superiores a 6,0 indican que el agua es corrosiva, mientras que los valores inferiores a 6,0 indican que es susceptible de formar incrustaciones. El agua del 81.25% de muestras se considera como corrosiva, aunque actualmente en la región el riego es por inundación y la conducción por canaletas, en el futuro si deseara usar un sistema de riego tecnificado se debe considerar este índice.

El índice de Saturación o LSI al igual que el Índice de Langelier, marca la tendencia a la precipitación o disolución de $CaCO_3$, definiendo así si el agua está sobresaturada o

infrasaturada respecto a esta sal. Con base en este índice las aguas se clasifican de la siguiente manera:

Cuadro 17 Índice de saturación y su clasificación

<i>Valor de LSI</i>	<i>Clase</i>
< 0	Agua infrasaturada en CaCO ₃ (Corrosiva)
= 0	Agua en equilibrio químico
> 0	Agua sobresaturada en CaCO ₃ (incrustante)

Los datos obtenidos muestran que el 78% del agua muestreada es incrustante y el 6.5% del agua es corrosiva; el resto está en equilibrio químico.

El índice de Puckorius (Practical Scaling Index) usa el pH de equilibrio en lugar del pH real del sistema para tener en cuenta sus efectos de incrustamiento. De esta manera tiene en cuenta la capacidad tampón del agua. Se trata de un índice con mucha utilidad práctica. De acuerdo a este índice las aguas se clasifican de la siguiente forma:

Cuadro 18 Índice de Puckorius y su clasificación

<i>Valor de PSI</i>	<i>Clase</i>
< 4.5	Tendencia a la corrosión
4.5 – 6.5	Rango óptimo
> 6.5	Tendencia a la incrustación

De acuerdo a este índice el 87.5% del agua muestreada tiene rango óptimo y sólo el 12.5% tendencia a la incrustación.

El índice de Larson (Lal) se centra en la evaluación de la capacidad corrosiva del agua, razón por la cual la calificación dada por dicho indicador se separó de los demás, los cuales además de la corrosión también consideran su poder incrustante. Sin embargo, este índice ha sido diseñado para los rangos existentes en los Grandes Lagos y se considera útil para aguas equilibradas y depuradas, en especial las aguas frías (<20°C). Con aguas de alcalinidad muy baja o alcalinidad muy alta no funciona bien. De acuerdo a este índice las aguas se clasifican de la siguiente forma:

Cuadro 19 Índice de Larson y su clasificación

Valor de Lal	Clase
< 0.8	No Corrosiva
0.8 – 1.2	Corrosión significativa
>1.2	Corrosión elevada

Para este índice se tiene que el 59.4% del agua muestreada pertenece a la clase de corrosión significativa, el 31.2% es corrosión elevada y el resto (9.4%) es de clase no corrosiva. Los resultados se muestran en el Cuadro 20.

Cuadro 20 Índice de corrosión o incrustación de las sales del agua de riego calculado con varios criterios: IL=Langelijer simplificado; RSI=índice de Ryznar; LSI=índice de saturación; PSI=índice de Puckorius; LAI=índice de Larson-Skold

Muestra	IL	RSI	LSI	PSI	Lal
01TULA	0.1	7.1	0.3	6.1	0.7
02TULA	0.1	7.2	0.3	6.6	1.7
03TULA	-0.1	6.9	0.0	5.0	0.9
04TULA	0.1	6.9	0.3	5.9	1.2
05TULA	-0.1	7.3	0.1	6.1	0.9
06TULA	-0.4	7.7	-0.2	6.4	1.0
07TULA	-0.1	7.2	0.0	5.8	0.8
08TULA	0.7	6.0	0.8	4.6	1.3
09TULA	0.2	6.4	0.3	4.6	1.1
10TULA	-0.2	7.4	0.0	6.3	1.7
11TULA	-0.5	7.6	-0.3	6.0	1.0
12TULA	0.5	6.7	0.7	6.1	1.5
13TULA	0.5	6.8	0.6	6.2	1.1
14TULA	-0.1	7.2	0.1	5.9	0.8
15TULA	0.0	7.1	0.2	6.0	0.7
16TULA	1.3	5.7	1.5	5.6	1.1
17TULA	1.2	5.9	1.3	5.7	1.2
18TULA	0.3	7.0	0.5	6.7	1.1
19TULA	0.6	6.2	0.8	5.1	1.2
20TULA	-0.2	7.4	0.0	6.2	0.7
21TULA	-0.2	7.9	0.0	7.8	2.5
22TULA	0.1	7.0	0.2	5.5	1.0
23TULA	1.3	5.9	1.4	6.0	1.6
24TULA	0.1	7.3	0.3	6.8	1.1
25TULA	0.4	6.7	0.6	6.0	1.3
26TULA	0.9	6.2	1.1	5.8	1.6
27TULA	0.9	6.1	1.0	5.7	1.7
28TULA	0.5	6.5	0.7	5.6	1.3
29TULA	0.4	6.7	0.6	5.8	1.4
30TULA	0.8	6.3	0.9	5.6	1.3
31TULA	0.8	6.4	1.0	6.1	1.0
32TULA	0.8	6.3	1.0	6.0	1.2
Corrosiva		81.25%	6.5%		No corrosiva 9.4%
Equilibrio	28%	18.75%		87.5%	Corrosiva significativamente 59.4%
Incrustante	72%		78%	12.5%	Corrosiva elevada 31.2%

Fuente: Elaboración propia

8.1.3. Contaminantes en las descargas de aguas residuales y su relación con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996

Contaminantes básicos, Metales pesados y cianuros

Las concentraciones de contaminantes básicos, metales pesados y cianuro para las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado como límite máximo permisible. El rango permisible del potencial hidrógeno (pH) es de 5 a 10 unidades.

Para determinar la contaminación por patógenos se tomó como indicador a los coliformes fecales. El límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas al suelo (uso de riego agrícola) es de 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales para cada 100 ml de agua para el promedio mensual diario, respectivamente.

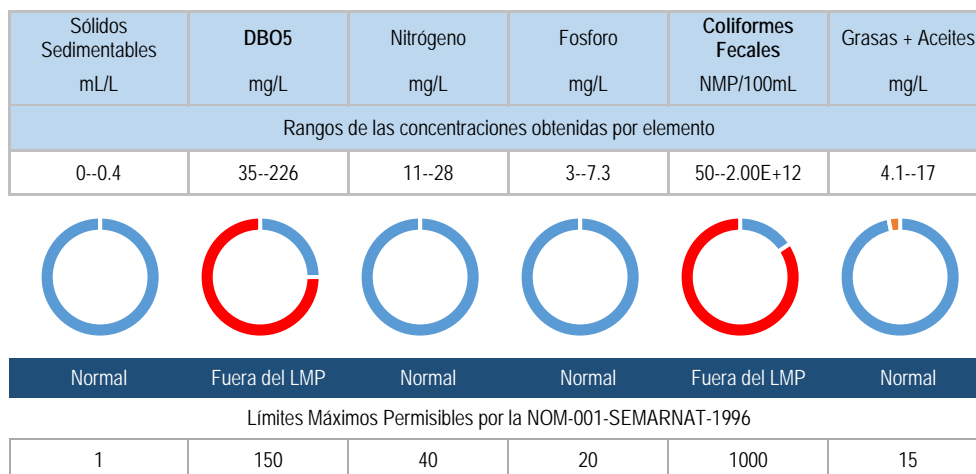
Los contaminantes que rebasaron los límites máximos permisibles de las muestras de agua analizadas se presentan en el Cuadro 21 y en los Cuadros 22 y 23 se muestra la interpretación gráfica.

Cuadro 21 Contaminantes que rebasaron los Límites Máximos Permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996

Contaminante	Porcentaje de las muestras que rebasaron los límites máximos permisibles	Cantidad de muestras que rebasaron los límites máximos permisibles
DBO5	75.0 %	24
Coliformes fecales (CF)	84.4 %	27
Grasas y Aceites (G+A)	3.1 %	1
Cadmio (Cd)	65.6 %	21
Cobre (Cu)	50.0 %	16
Cromo (Cr)	65.6 %	21
Níquel (Ni)	37.5 %	12
Mercurio (Hg)	12.5 %	4

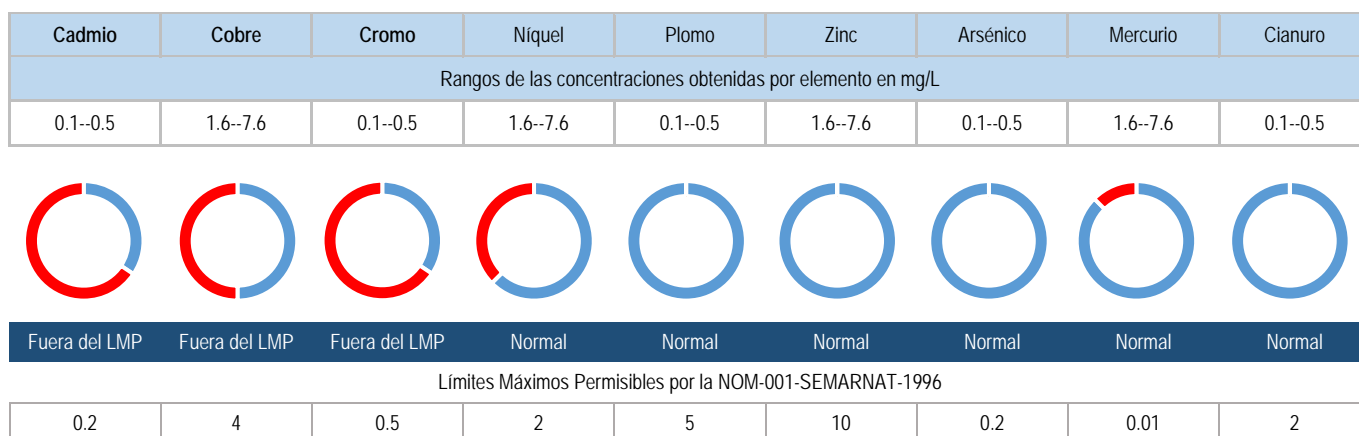
Fuente: NOM-001-SEMARNAT-1996

Cuadro 22 Contaminantes básicos bajo la interpretación de la NOM-001-SEMARNAT-1996



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 23 Metales pesados y cianuro bajo la interpretación de la NOM-001-SEMARNAT-1996



Fuente: Elaboración propia

Las muestras analizadas tienen un pH de entre 6.7 y 8.4, lo cual está dentro de las unidades consideradas normales. En relación con los contaminantes básicos que se analizaron el DBO5 del 75% de las muestras está por encima de los límites máximos permisibles (LMP), para Coliformes fecales el 84.4% de las muestras rebasa los LMP, para G+A solo el 3.1% rebasa los LMP.

Para los metales pesados el cadmio y cromo el 65.6% de lo muestreado rebasaron los LMP mientras que para el cobre el 50% de lo muestreado rebasó dicho LMP. Dichos elementos son los de mayor presencia en el agua. Los metales pesados de menor

concentración en el agua son el níquel y el mercurio, rebasando los LMP el 37.5% y 12.5% de lo muestreado, respectivamente.

Los demás elementos analizados no se encontraron fuera de los LMP; los resultados obtenidos para todos los elementos analizados se presentan en la Cuadro 24.

Cuadro 24 Contaminantes básicos, metales pesados y cianuro

Muestra	Temp °	pH	SS mL/L	DBO5 mg/L	N mg/L	P mg/L	CF NMP/100m L	G+A mg/L	Cd mg/L	Cu mg/L	Cr mg/L	Ni mg/L	Pb mg/L	Zn mg/L	As mg/L	Hg mg/L	CN mg/L
01TULA	20.8	7.3	0.10	35	19	3.0	2.00E+03	6.1	0.260	4.80	0.32	1.58	0.27	4.08	0.110	0.015	0.030
02TULA	18.8	7.4	0.09	125	21	6.8	4.00E+06	5.8	0.304	3.60	0.64	1.60	0.26	1.92	0.070	0.004	0.015
03TULA	24.3	6.7	0.35	138	17	5.8	1.00E+05	10.2	0.190	5.80	0.84	2.50	0.25	7.02	0.140	0.007	0.023
04TULA	21.7	7.2	0.10	115	13	5.0	2.00E+04	6.6	0.324	6.53	0.56	1.60	0.36	3.39	0.050	0.002	0.015
05TULA	22.2	7.1	0.17	115	25	4.8	2.00E+05	4.1	0.300	4.60	0.37	2.30	0.12	5.10	0.050	0.002	0.027
06TULA	19.5	6.9	0.11	96	23	5.3	8.00E+03	5.1	0.410	3.63	0.36	2.50	0.25	2.19	0.050	0.006	0.035
07TULA	22.6	7.0	0.22	138	18	3.9	7.00E+04	8.0	0.250	4.23	0.94	1.20	0.20	3.30	0.035	0.003	0.040
08TULA	25.2	7.3	0.21	157	20	6.1	8.00E+05	12.3	0.160	2.00	0.95	2.30	0.35	4.50	0.140	0.002	0.028
09TULA	21.3	6.9	0.34	210	23	7.3	2.00E+10	17.0	0.190	6.20	0.71	2.10	0.43	7.14	0.110	0.005	0.035
10TULA	18.5	7.0	0.03	73	23	3.9	3.00E+02	8.1	0.284	3.50	0.34	1.13	0.23	1.02	0.038	0.010	0.010
11TULA	20.3	6.7	0.21	56	23	4.5	5.00E+01	9.2	0.180	1.60	0.68	1.96	0.28	3.45	0.070	0.012	0.018
12TULA	20.1	7.7	0.23	79	18	5.0	2.00E+07	5.3	0.125	6.50	0.77	2.10	0.13	2.46	0.060	0.005	0.050
13TULA	21.1	7.7	0.11	115	25	5.5	1.00E+05	4.4	0.350	4.40	0.27	1.80	0.28	1.17	0.090	0.006	0.025
14TULA	19.6	7.1	0.10	113	16	4.2	7.00E+03	9.0	0.450	3.70	0.58	1.13	0.20	3.96	0.120	0.018	0.023
15TULA	19.3	7.2	0.15	138	23	5.2	2.00E+05	6.4	0.342	2.80	1.05	1.38	0.15	1.47	0.045	0.006	0.053
16TULA	20.8	8.4	0.23	90	20	4.2	4.00E+03	11.3	0.125	3.40	0.56	1.27	0.20	2.88	0.090	0.010	0.040
17TULA	20.6	8.2	0.15	137	20	5.4	1.00E+05	6.5	0.300	4.80	0.57	1.13	0.42	7.08	0.055	0.011	0.015
18TULA	25.5	7.6	0.03	83	15	4.4	7.00E+03	6.7	0.175	3.30	0.38	1.30	0.10	1.89	0.035	0.005	0.046
19TULA	20.1	7.5	0.20	143	20	4.7	9.00E+09	12.3	0.170	7.60	0.73	2.12	0.38	6.00	0.105	0.004	0.025
20TULA	22.0	7.1	0.15	73	15	4.3	2.00E+02	6.2	0.450	3.83	0.58	1.30	0.32	1.65	0.060	0.005	0.018
21TULA	20.0	7.5	0.05	66	18	3.6	1.00E+05	6.3	0.414	3.98	0.36	2.00	0.15	1.74	0.040	0.007	0.030
22TULA	19.8	7.1	0.28	86	25	5.3	5.00E+02	9.6	0.260	3.60	0.83	2.10	0.35	7.59	0.130	0.003	0.020
23TULA	17.3	8.4	0.20	66	26	4.6	4.00E+11	12.2	0.272	4.70	0.39	1.23	0.13	2.49	0.073	0.004	0.030
24TULA	21.3	7.4	0.07	43	11	4.8	5.00E+01	5.2	0.342	3.40	0.29	2.10	0.25	3.84	0.077	0.006	0.013
25TULA	22.0	7.6	0.10	93	18	4.9	5.00E+04	9.6	0.315	3.80	0.73	1.20	0.25	5.55	0.100	0.003	0.016
26TULA	20.1	8.0	0.36	170	19	5.3	1.00E+09	7.4	0.308	4.80	0.50	1.70	0.27	4.08	0.096	0.008	0.020
27TULA	21.3	7.9	0.25	183	21	5.9	2.00E+12	6.0	0.135	6.30	0.85	2.30	0.23	3.45	0.025	0.005	0.020
28TULA	17.1	7.5	0.24	226	23	6.1	2.00E+09	10.3	0.210	4.50	0.95	2.20	0.15	5.40	0.095	0.005	0.043
29TULA	15.8	7.5	0.35	180	26	6.2	1.00E+10	9.1	0.165	4.00	0.73	1.65	0.35	6.30	0.154	0.009	0.013
30TULA	19.5	7.8	0.17	135	28	6.2	5.00E+06	13.9	0.284	7.30	0.96	2.15	0.42	7.26	0.090	0.008	0.020
31TULA	21.0	8.0	0.12	75	17	4.2	6.00E+06	5.0	0.180	2.60	0.48	1.35	0.33	2.25	0.080	0.010	0.028
32TULA	23.5	8.0	0.13	96	12	3.8	9.00E+04	5.2	0.355	6.30	0.98	1.30	0.43	2.31	0.060	0.008	0.050
6.5 - 8.4	1	75 o 150	40	20	1,000	15	0.2	4	0.5	2	5	10	0.2	0.01	2		
Valor normal	Límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996																
% Muestreo fuera del límite máximo permisible	-	75	-	-	84.4	3	65.6	50	65.6	37.5	-	-	-	12.5	-		

Fuente: Elaboración propia

8.1.4. Calidad del agua residual

Determinación de la calidad del agua para riego por Ayers y Wescott (1987)

La clasificación propuesta por Ayers y Wescot se apoya en el uso de los valores de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos y se clasifica de acuerdo a lo siguiente:

Cuadro 25 Clasificación del agua para riego según Ayers y Wescott, 1987

<u>GRADO DEL PROBLEMA</u>			
	<i>No problema</i>	<i>Aumento</i>	<i>SEVERO</i>
C.E.	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
STD	< 450	450-2000	> 2000

Fuente: Ayers y Wescott, 1987

Los resultados obtenidos (Cuadro 26) según esta clasificación son sólo dos y de los cuales el Problema en Aumento se encuentra en la mayoría de las muestras de agua con un valor representativo del 96.9% de lo analizado y sólo se encuentra un caso con Problema Severo.

Cuadro 26 Determinación de la calidad del agua para riego por Ayers y Wescott (1987)

Muestra	CE (mS/cm)	RSE o STD (ppm)	Problema
01TULA	1.39	1,102	Aumento
02TULA	1.21	914	Aumento
03TULA	2.00	1,478	Aumento
04TULA	1.31	1,025	Aumento
05TULA	1.52	1,101	Aumento
06TULA	1.19	843	Aumento
07TULA	1.53	1,078	Aumento
08TULA	2.46	1,819	Aumento
09TULA	3.11	2,370	Severo
10TULA	1.06	728	Aumento
11TULA	1.40	953	Aumento
12TULA	1.41	1,054	Aumento
13TULA	1.28	968	Aumento
14TULA	1.51	1,013	Aumento
15TULA	1.45	1,000	Aumento
16TULA	1.65	1,096	Aumento
17TULA	1.59	1,197	Aumento
18TULA	0.87	617	Aumento
19TULA	2.06	1,525	Aumento
20TULA	1.23	953	Aumento
21TULA	0.94	695	Aumento
22TULA	2.03	1,499	Aumento
23TULA	1.59	1,236	Aumento
24TULA	0.87	617	Aumento
25TULA	1.30	886	Aumento
26TULA	1.81	1,204	Aumento
27TULA	1.77	1,280	Aumento
28TULA	1.84	1,349	Aumento
29TULA	1.84	1,405	Aumento

Muestra	CE (mS/cm)	RSE o STD (ppm)	Problema
30TULA	2.06	1,463	Aumento
31TULA	1.37	925	Aumento
32TULA	1.36	1,044	Aumento

Fuente: *Elaboración propia*

Clasificación de la calidad del agua según Richards (1954)

La clasificación de agua para riego de Richards (1954) considera el riesgo de sodicidad y salinidad a partir del índice RAS y el valor de conductividad eléctrica. La sodicidad es una función de la relación de Na^+ respecto a la de Ca^{+2} según RAS. A continuación se presentan las clasificaciones en función de la salinidad y RAS.

Cuadro 27 Clasificación del agua para riego según Richards, 1954

Clasificación por Salinidad			Clasificación por Sodicidad		
$2.5 > CE > 0$	C1	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos	$10 > RAS > 0$	S1	Puede ser usada para riego en casi todos los suelos, con poco peligro de desarrollo de modicidad
$7.5 > CE > 2.5$	C2	Puede ser usada si existe lavado moderado	$18 > RAS > 10$	S2	Puede presentar problemas moderados en la mayoría de los suelos
$22.5 > CE > 7.5$	C3	No puede usarse en suelos con restricción de drenaje	$26 > RAS > 18$	S3	Puede presentar problemas de modicidad en la mayoría de los suelos
$CE > 22.5$	C4	No es buena para riego bajo condiciones ordinarias pero puede usarse en circunstancias especiales	$RAS > 26$	S4	Generalmente no debe usarse para riego

Fuente: Richards, 1954

De acuerdo a esta clasificación se obtuvieron cuatro clases para las muestras de aguas residuales analizadas (Cuadro 28); las cuales de acuerdo a la CE se encuentra la C1 “Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos” y C2 “Puede ser usada si existe lavado moderado”, siendo en su mayoría C1 (96.9%) y solo una muestra con C2; para la clasificación de CE y RAS, la clase que sobresale es la **C1-S4** con un 71.9% del total del muestreo de agua (S4 = Generalmente no debe usarse para riego), para la clase **C1-S3** se obtuvo un 18.8% de las muestras analizadas (S3 = Puede presentar problemas de sodicidad en la mayoría de los suelos) y para la clase **C1-S2** con el 6.3% (S2 = Puede presentar problemas moderados en la mayoría de los suelos) y como ultima clase la **C2-S4** (3%) siendo la de más alto valor reportado para RAS y CE.

Cuadro 28 Interpretación de los resultados del agua residual, de acuerdo a la clasificación de Richards (1954)

Muestra	RAS	CE (mS/cm)	Clasificación en función de CE y RAS	
01TULA	37.4	1.39	C1-S4	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; <u>Generalmente no debe usarse para riego</u>
02TULA	23.8	1.21	C1-S3	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; Puede presentar <u>problemas modicidad</u> en la mayoría de los suelos
03TULA	38.7	2.00	C1-S4	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; <u>Generalmente no debe usarse para riego</u>
04TULA	26.6	1.31		
05TULA	38.2	1.52		
06TULA	26.8	1.19		
07TULA	36.0	1.53		
08TULA	43.3	2.46		
09TULA	49.5	3.11	C2-S4	Puede ser usada si existe lavado moderado; <u>Generalmente no debe usarse para riego</u>
10TULA	22.8	1.06	C1-S3	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; Puede presentar <u>problemas modicidad</u> en la mayoría de los suelos
11TULA	30.9	1.40	C1-S4	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; <u>Generalmente no debe usarse para riego</u>
12TULA	27.3	1.41		
13TULA	23.9	1.28	C1-S3	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; Puede presentar <u>problemas modicidad</u> en la mayoría de los suelos
14TULA	33.5	1.51	C1-S4	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; <u>Generalmente no debe usarse para riego</u>
15TULA	26.9	1.45		
16TULA	30.7	1.65		
17TULA	27.2	1.59		
18TULA	14.5	0.87	C1-S2	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; Puede presentar <u>problemas moderados</u> en la mayoría de los suelos
19TULA	38.9	2.06	C1-S4	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; <u>Generalmente no debe usarse para riego</u>
20TULA	31.0	1.23		
21TULA	18.4	0.94	C1-S3	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; Puede presentar <u>problemas modicidad</u> en la mayoría de los suelos
22TULA	46.9	2.03	C1-S4	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; <u>Generalmente no debe usarse para riego</u>
23TULA	29.0	1.59		
24TULA	14.7	0.87	C1-S2	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; Puede presentar <u>problemas moderados</u> en la mayoría de los suelos
25TULA	26.5	1.30	C1-S4	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; <u>Generalmente no debe usarse para riego</u>
26TULA	37.9	1.81		
27TULA	34.7	1.77		
28TULA	31.4	1.84		
29TULA	29.4	1.84		
30TULA	30.6	2.06		
31TULA	25.6	1.37	C1-S3	Puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelos; Puede presentar <u>problemas modicidad</u> en la mayoría de los suelos
32TULA	25.5	1.36		

Fuente: Elaboración propia

8. 2. Calidad del suelo

El Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America define la calidad del suelo como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat.

El suelo es el resultado de la actuación de diversas variables, que interactúan entre sí a través del tiempo, a las cuales se les conoce como factores formadores, lo que origina la constitución de las fases sólida, líquida y gaseosa, las cuales hacen que el suelo tenga una serie de propiedades que dependen de la composición y constitución de sus componentes. La fase líquida facilita la reacción entre las tres fases del suelo, aunque también se llevan a cabo reacciones dentro de cada fase. En la fase sólida se encuentran los minerales y los compuestos orgánicos, donde los primeros (la fracción mineral) representan entre 45 al 49% del volumen del suelo y dentro de la fase sólida del 1 al 10% está representado por la materia orgánica.

En los suelos del Valle del Mezquital, se encuentran tres oxígenos compartidos por cada tetraedro y con un agrupamiento plano entre los mismos, lo que da origen a los filosilicatos a la cual pertenecen la mayoría de los minerales de la fracción arcilla.

Los componentes minerales de la fase sólida del suelo, se organiza en partículas de diferente tamaño cuya granulometría es esencial para evaluar las propiedades edáficas. Cabe aclarar que para la clasificación de los constituyentes del suelo según su tamaño de partícula existen diversas propuestas y aunque todas consideran los términos de grava, arena, limo y arcilla, difieren en los límites entre cada uno de ellos para definir cada clase. De estas, las aceptadas por la comunidad académica internacional son: la de Atterberg y la del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

El muestreo de suelo se llevó a cabo en 35 sitios de muestreo distribuidos en el DR003-Tula (Figura 18).

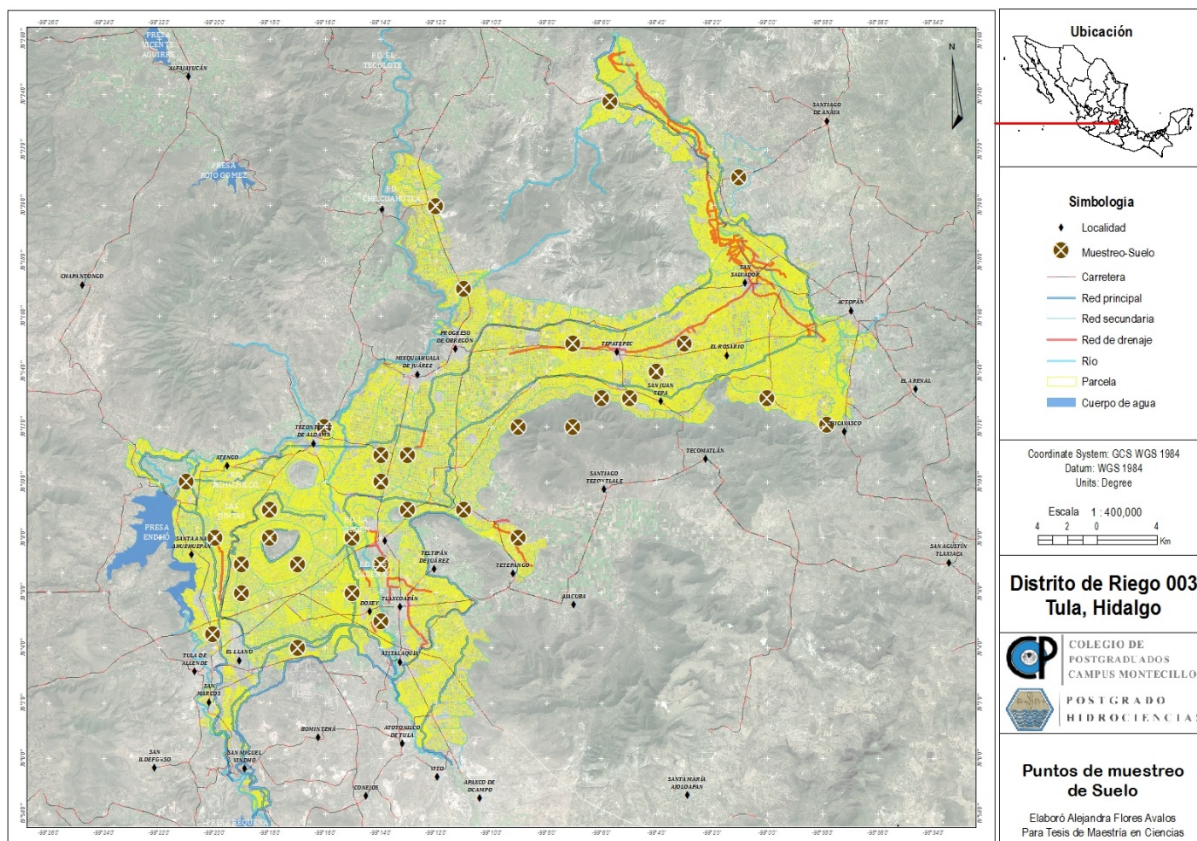


Figura 18 Ubicación de los sitios de muestreo de suelo dentro del DR003-Tula

8.2.1. Caracterización física y química del suelo

El suelo está formado por partículas minerales de diferente tamaño (arena, limo y arcilla), materia orgánica y numerosas especies de organismos; sus propiedades físicas y químicas pueden ser indicadores que permitan analizar la situación de este, así como los posibles impactos de una intervención antrópica y así poder determinar si el uso del recurso es sostenible.

Para el presente estudio se obtuvieron los siguientes indicadores siendo los de tipo físicos: Textura, Densidad aparente, Constantes hídricas (saturación del suelo, capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente) y los químicos: Conductividad eléctrica, pH, Materia orgánica (Cuadro 29). Con base en la Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del suelo del USDA, 1999; provee en la sección II una guía para la interpretación de los resultados ocupados en los temas de Textura y Densidad aparente.

La NOM-021-SEMARNAT-2000, cuenta con la información para interpretar los resultados de conductividad eléctrica, pH y materia orgánica.

Cuadro 29 Resultados obtenidos de acuerdo a las muestras de suelo analizadas

Muestra	Contenido de arena %	Contenido de limo %	Contenido de arcilla %	Densidad aparente g/cm ³	Saturación del suelo (gH ₂ O/g)	Capacidad de campo (gH ₂ O/g)	Punto de marchitamiento o permanente (gH ₂ O/g)	Conductividad eléctrica (relación 2:1 agua:suelo)	pH (relación 2:1 agua:suelo)	Materia orgánica total %	Sumatoria de bases intercambiables cMolc/kg
01TULA	54	26	20	1.28	48	28	17	0.3	7.4	5.7	46.1
02TULA	58	26	16	1.19	42	31	15	0.23	7.8	6.3	61
03TULA	54	32	14	1.11	57	38	24	0.28	8.6	6.7	67.4
04TULA	43	31	26	1.14	42	38	20	0.58	8.4	6.1	69.2
05TULA	28	36	36	1.09	44	40	27	0.9	8.9	6.7	77.4
06TULA	48	34	18	1.09	49	35	23	0.24	8.6	7.7	64.9
07TULA	37	31	32	1.2	54	40	25	0.36	8.7	4.2	68.8
08TULA	34	24	42	1.16	55	35	25	0.21	8.7	5	44.1
09TULA	33	34	34	1.15	49	40	26	0.63	8.8	5.4	73.1
10TULA	30	26	44	1.25	53	43	24	0.46	8.3	2.5	68.7
11TULA	40	38	22	1.22	54	42	26	0.44	7.4	4.4	69.5
12TULA	40	42	18	1.22	50	32	21	0.46	8.1	5.1	70.2
13TULA	18	34	48	1.28	51	46	23	0.07	8.4	5.1	68.7
14TULA	30	32	38	1.25	51	37	22	0.07	6.8	5.6	40.8
15TULA	46	34	20	1.22	55	33	20	0.06	7.7	6.9	61.9
16TULA	28	38	34	1.25	57	39	26	0.1	8.7	8	49.5
17TULA	36	30	34	1.23	58	40	24	0.07	8	7.6	58.8
18TULA	42	36	22	1.22	57	40	21	0.43	8.6	9.6	70.4
19TULA	14	26	60	1.25	60	48	31	0.62	7.6	4.4	40.7
20TULA	50	28	22	1.19	43	33	21	0.39	8.9	7.2	62.6
21TULA	52	28	20	1.25	40	30	17	0.33	8.3	5.1	70.6
22TULA	32	30	38	1.22	53	39	23	0.51	8.9	5.5	76.3
23TULA	46	33	21	1.23	47	36	21	0.38	7.9	4.8	70
24TULA	22	28	50	1.25	63	48	29	0.35	8.1	3.8	77
25TULA	20	38	42	1.25	61	49	25	0.36	8.4	2.5	72.7
26TULA	16	30	54	1.19	52	46	28	0.23	7.4	3.8	59.6
27TULA	25	34	41	1.18	54	45	25	0.29	7.7	2.5	64.9
28TULA	44	30	26	1.25	33	33	17	0.43	8.8	4.4	71.4
29TULA	29	34	37	1.18	52	40	25	0.16	7.8	5.3	53.3
30TULA	27	34	39	1.18	53	43	25	0.22	7.7	3.9	59.1
31TULA	30	30	40	1.11	46	41	25	0.22	6.9	2.5	57
32TULA	34	28	38	1.19	43	34	21	0.23	8.8	6.4	58.7
33TULA	56	24	20	1.18	45	29	19	0.23	8.8	7.4	59.7
34TULA	36	38	26	1.11	46	39	27	0.24	8.7	5.3	72.5
35TULA	12	44	44	1.11	58	40	23	0.2	8.7	7.1	55.9

Fuente: Elaboración propia

Textura

La **textura** es uno de los más estables atributos del suelo pudiendo sólo ser modificada ligeramente por cultivación y otras prácticas que causan la mezcla de las diferentes capas del suelo. El término textura se emplea para representar la composición granulométrica del suelo y cada valor corresponde a una proporción cuantitativa de arena, limo y arcilla, donde sólo se hace referencia a la fracción mineral que se conoce como tierra fina. Al respecto, es importante indicar que esas partículas no están sueltas porque forman agregados y para su análisis se separan en partículas individuales mediante métodos físicos y químicos, donde ambos deben emplearse porque los agentes que son capaces de la agregación son de origen distintos. La extracción final de las fracciones se llevó a cabo por tamizado de las arenas y por sedimentación en fase acuosa de limos y arcillas.

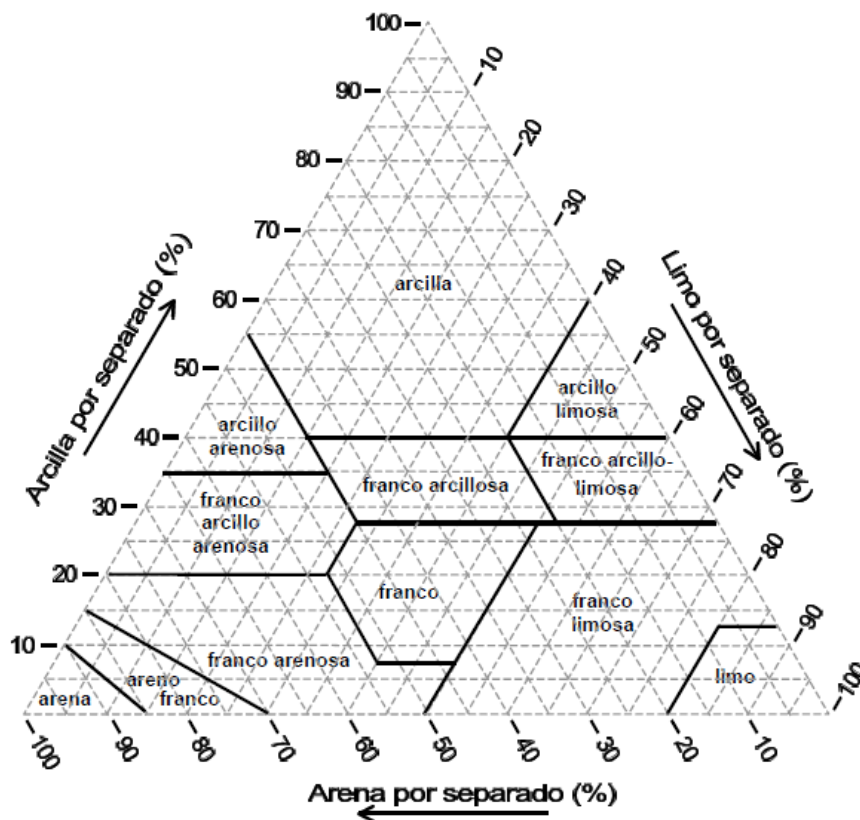


Figura 19 Triángulo textural del suelo mostrando los porcentajes de arcilla, limo y arena de las clases texturales

Para las muestras de suelo analizadas se definieron las clases de texturas con base en el triángulo textural del suelo (Figura 19), de acuerdo a los resultados obtenidos presentes en el Cuadro 30, donde se puede observar que las clases de suelo Franco, Franco-arcillosa y Arcilla son las más representativas ya que cuentan con la mayoría de incidencia sobre lo muestreado.

Cuadro 30 Clase textural de las muestras de suelo analizadas

Clase Textural del suelo	Muestras	% del muestreo
<i>Franco</i>	11	31.4
<i>Franco-arcillosa</i>	10	28.6
<i>Arcilla</i>	9	25.7
<i>Franco-arenosa</i>	4	11.4
<i>Arcillo-limosa</i>	1	2.9

Para una mejor representación de dichos datos de textura, se ejemplifica mediante una imagen de la distribución de los tipos de textura con ayuda de un mapa de predicción que se acopló al DR003-Tula (Figura 20), más adelante esta imagen nos ayuda a analizar algunas otras características del suelo.

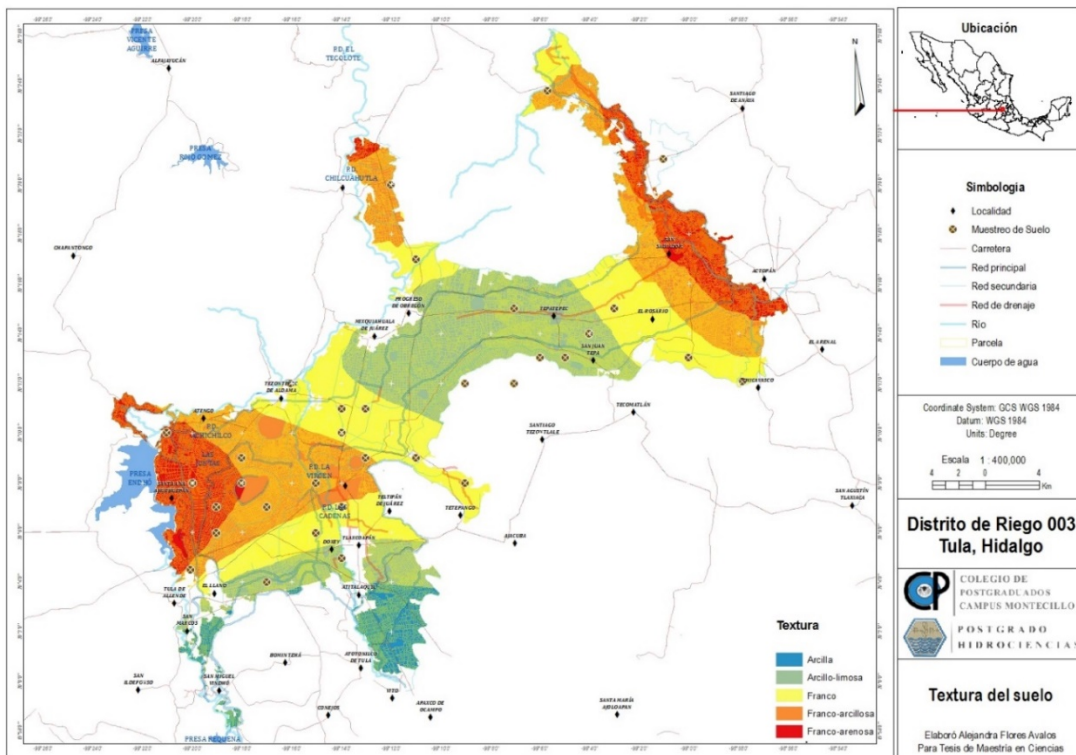


Figura 20 Distribución espacial en el DR003-Tula de la textura del suelo

Densidad aparente

La **densidad aparente** es definida como la relación entre la masa del suelo secado en horno y el volumen global, que incluye el volumen de las partículas y el espacio poroso entre las partículas. Es una propiedad dinámica que varía con la condición estructural del suelo, puede ser afectada por prácticas de pastoreo, agrícolas y clima; con compactación de los estratos la densidad es alta.

De acuerdo a la Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo, del USDA, 1999. Se cuenta con la Relación general entre densidad aparente del suelo y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo. Lo cual se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 31 Relación general entre densidad aparente del suelo y crecimiento radicular, en base a la textura del suelo

Textura del suelo	Densidades aparentes ideales (g/cm ³)	Densidades aparentes que pueden afectar el crecimiento radicular (g/cm ³)	Densidades aparentes que restringen el crecimiento radicular (g/cm ³)
<i>Arena, areno-franco</i>	<1.60	1.69	>1.80
<i>Franco-arenosa, franco</i>	<1.40	1.63	>1.80
<i>Franco-arcilla-arenosa, franco, franco-arcillosa</i>	<1.40	1.6	>1.75
<i>Limosa, franco-limosa</i>	<1.30	1.6	>1.75
<i>Franco-limosa, franco-arcillo-limosa</i>	<1.40	1.55	>1.65
<i>Arcillo-arenosa, arcillo-limosa, algunas franco-arcillosas 45% de arcilla)</i>	<1.10	1.39	>1.58
<i>Arcillosa (>45% de arcilla)</i>	<1.10	1.39	>1.47

Fuente: USDA, 1999

En base a la guía del USDA, 1999, se obtuvieron las siguientes clasificaciones por cada muestra de suelo del DR003-Tula y se presentan en el Cuadro 32.

Cuadro 32 Relación de Densidad aparente y Textura

Muestra	Densidad aparente g/cm ³	Textura	Densidad aparente ideal g/cm ³	Densidad aparente que puede afectar el crecimiento radicular g/cm ³	Densidad aparente que restringe el crecimiento radicular g/cm ³
01TULA	1.28	Franco-arenosa	< 1.40		
02TULA	1.19	Franco-arenosa	< 1.40		
03TULA	1.11	Franco-arenosa	< 1.40		
04TULA	1.14	Franco	< 1.40		
05TULA	1.09	Franco arcillosa	< 1.10		
06TULA	1.09	Franco	< 1.40		
07TULA	1.20	Franco-arcillosa	< 1.10	1.60	>1.75
08TULA	1.16	Arcilla	< 1.10	1.39	>1.58
09TULA	1.15	Franco-arcillosa	< 1.10	1.60	>1.75
10TULA	1.25	Arcilla	< 1.10	1.39	>1.58

Muestra	Densidad aparente g/cm ³	Textura	Densidad aparente ideal g/cm ³	Densidad aparente que puede afectar el crecimiento radicular g/cm ³	Densidad aparente que restringe el crecimiento radicular g/cm ³
11TULA	1.22	Franco	< 1.40		
12TULA	1.22	Franco	< 1.40		
13TULA	1.28	Arcilla	< 1.10	1.39	>1.58
14TULA	1.25	Franco-arcillosa	< 1.10	1.60	>1.75
15TULA	1.22	Franco	< 1.40		
16TULA	1.25	Franco-arcillosa	< 1.10	1.60	>1.75
17TULA	1.23	Franco-arcillosa	< 1.10	1.60	>1.75
18TULA	1.22	Franco	< 1.40		
19TULA	1.25	Arcilla	< 1.10	1.39	>1.58
20TULA	1.19	Franco	< 1.40		
21TULA	1.25	Franco	< 1.40		
22TULA	1.22	Franco-arcillosa	< 1.10	1.60	>1.75
23TULA	1.23	Franco	< 1.40		
24TULA	1.25	Arcilla	< 1.10	1.39	>1.58
25TULA	1.25	Arcilla	< 1.10	1.39	>1.58
26TULA	1.19	Arcilla	< 1.10	1.39	>1.58
27TULA	1.18	Arcilla	< 1.10	1.39	>1.58
28TULA	1.25	Franco	< 1.40		
29TULA	1.18	Franco-arcillosa	< 1.10	1.60	>1.75
30TULA	1.18	Franco-arcillosa	< 1.10	1.60	>1.75
31TULA	1.11	Arcilla	< 1.10	1.39	>1.58
32TULA	1.19	Franco-arcillosa	< 1.10	1.60	>1.75
33TULA	1.18	Franco-arenosa	< 1.10	1.63	>1.80
34TULA	1.11	Franco	< 1.40		
35TULA	1.11	Arcillo-limosa	< 1.10		

Fuente: Elaboración propia

De las muestras analizadas 16 se encuentran por debajo del valor ideal de densidad aparente, y 19 muestras tienen densidad aparente mayor a la ideal, siendo estas del tipo textural Arcillosa y Franco-arcillosa (54.3% de lo muestreado). La densidad aparente fuera del rango ideal causa problemas sobre el crecimiento radicular. Ninguna de las muestras rebasa el límite para causar afectación. La guía muestra el rango de densidad aparente que puede restringir el crecimiento radicular, el cual nunca fue rebasado en los resultados obtenidos.

Constantes hídricas (Saturación del suelo, Capacidad de campo (CC), Punto de marchitamiento permanente (PMP))

Con los datos obtenidos para las **Constantes Hídricas** se elaboró un mapa de predicción por constante donde se observa la distribución de cada una en el DR003-Tula (Figura 21). En general cada constante muestra un patrón de distribución similar, que se relaciona

con los tipos de suelo de cada zona. El patrón también se relaciona con la clase de textura.

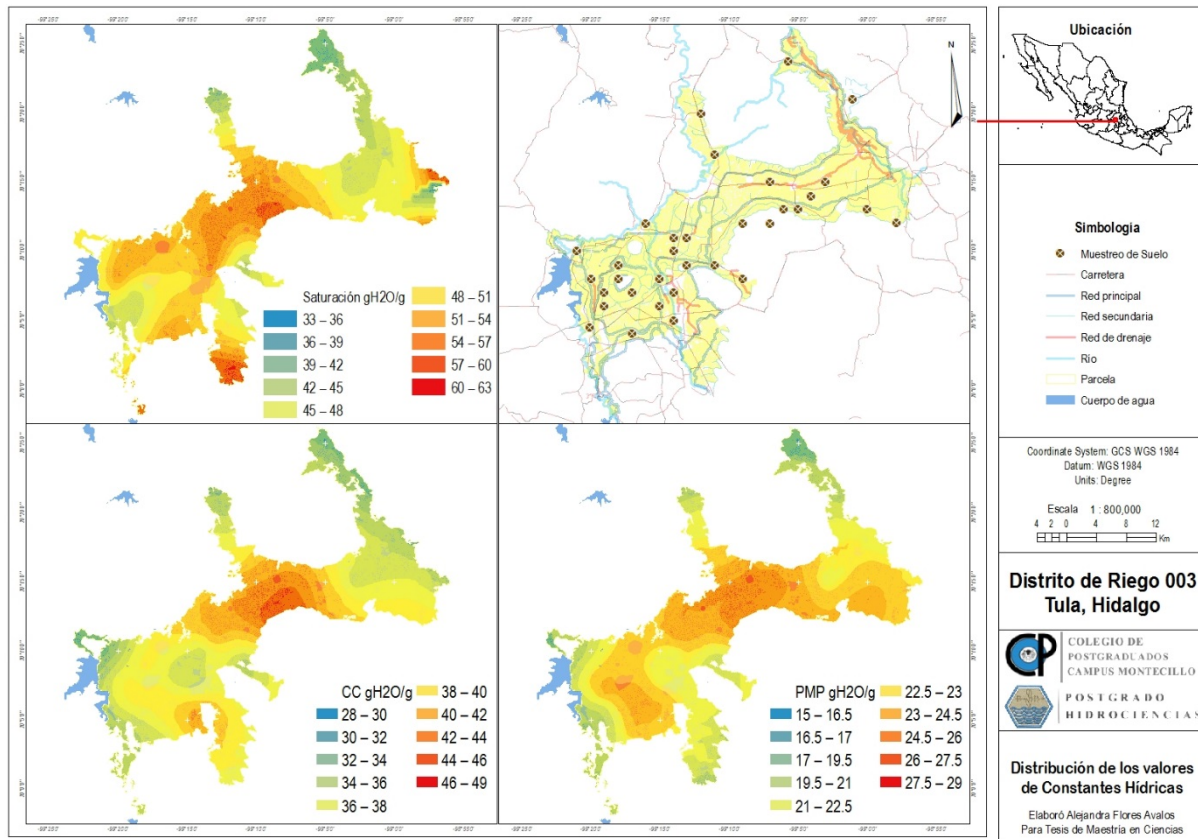


Figura 21 Distribución espacial de las constantes hídricas

Conductividad eléctrica (relación 2:1 agua:suelo)

La **conductividad eléctrica** de mezclas de suelo-agua indica la cantidad de sales presentes en el suelo. Los suelos contienen una porción de sales, siendo estas esenciales para el crecimiento de las plantas; pero se debe considerar que en exceso las sales pueden inhibir el crecimiento radicular.

Cuadro 33 Clasificación de conductividad eléctrica según la NOM-021-SEMARNAT-2000

CE dS m ⁻¹	Efectos
< 1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1 – 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 – 4.0	Moderadamente salino
4.1 – 8.0	Suelo salino

CE dS m ⁻¹	Efectos
8.1 – 16.0	Fuertemente salino
>16.0	Muy fuertemente salino

Fuente: NOM-021-SEMARNAT-2000

Para las muestras analizadas y de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000; todas las muestras tienen la clasificación: “Efectos despreciables de la salinidad” ya que se encuentran por debajo de 1 dS m⁻¹; por lo que no se prevén problemas de salinidad con base en la conductividad eléctrica del suelo.

pH (Relación 2:1 agua:suelo)

EL **pH** del suelo es una medida de la acidez o alcalinidad de un suelo, y afecta la disponibilidad de los nutrientes, la actividad de microorganismos, y la solubilidad de minerales del suelo. Comúnmente valores de pH entre 6.0 y 7.5 son óptimos para el crecimiento de la mayoría de los cultivos.

Cuadro 34 Clasificación del suelo en cuanto a pH según la NOM-021-SEMARNAT-2000

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

Fuente: NOM-021-SEMARNAT-2000

En relación con el pH de las muestras (Cuadro 34) se obtuvieron tres categorías: neutro, medianamente alcalino y fuertemente alcalino, representando el 6, 51 y 43% de las muestras, respectivamente. Para la clase de medianamente alcalino se sabe que pueden contener alto contenido de calcio y magnesio, mientras que para la clase fuertemente alcalino los suelos pueden presentar exceso de sodio y potasio; estos parámetros se podrán confirmar más adelante con los valores de las concentraciones para dichos elementos mencionados.

La asimilación de nutrientes del suelo está influida por el pH porque algunos nutrientes interactúan entre sí formando compuestos con diferente solubilidad. A pH <9 prevalecen condiciones alcalinas apropiadas para la biomasa microbiana así como la concentración de nitrógeno, potasio, azufre, molibdeno y boro, pero inadecuadas para la disponibilidad

de otros nutrimentos, ya que interfiere negativamente con la solubilidad del fósforo, hierro, manganeso, zinc, cobre y cobalto. En el área del presente estudio los suelos de clase fuertemente alcalino se encuentran en los módulos de riego Actopan, Endhó-Xochitlán, Tula, y Xicuco.

Materia orgánica total

La **materia orgánica** de los suelos es el producto de la descomposición química de las excreciones de animales y microorganismos, de residuos de plantas o de la degradación de cualquiera de ellos tras su muerte. Es una propiedad química la cual define la fertilidad el suelo, estabilidad y erosión.

Los suelos minerales son los de un contenido de materia orgánica menor del 20 % cabe mencionar que en los suelos de labor el contenido medio aproximado de materia orgánica oscila entre el 1 y el 6 %.

Para la determinación de materia orgánica se evaluó a través del contenido de carbono orgánico determinado con el método de Walkley y Black.

Cuadro 35 Clasificación de materia orgánica según la NOM-021-SEMARNAT-2000

Clase	Materia orgánica (%) Suelos no volcánicos o minerales
<i>Muy bajo</i>	< 0.5
<i>Bajo</i>	0.6 - 1.5
<i>Medio</i>	1.6 - 3.5
<i>Alto</i>	3.6 - 6.0
<i>Muy alto</i>	> 6.0

Fuente: NOM-021-SEMARNAT-2000

De acuerdo a las clases obtenidas según la NOM-021-SEMARNAT-2000 las muestras se distribuyeron de la siguiente forma: 51.4% en clase alto, 34.3% con clase muy alto, y el 14.3% con medio contenido de materia orgánica. Más de la mitad de las muestras analizadas se encuentran con alto porcentaje de materia orgánica, y esto puede ser en parte consecuencia por los residuos de los cultivos y el uso de las aguas residuales, ya que dichas aguas tienen altos contenidos de SDT.

Cuadro 36 Variables empleadas para la caracterización del suelo

Muestra	Contenido de partículas			Textura	Densidad aparente g/cm ³	Saturación del suelo (gH ₂ O/g)	Capacidad de campo (gH ₂ O/g)	Punto de marchitamiento permanente (gH ₂ O/g)	Conductividad eléctrica (relación 2:1 agua:suelo)	pH (relación 2:1 agua:suelo) y Clase de alcalinidad		Materia orgánica total % Clase M.O.	Sumatoria de bases intercambiables cMolc/kg	
	Arena %	Limo %	Arcilla %											
01TULA	54	26	20	Franco-arenosa	1.28	26	20	1.28	0.3	7.4	Medianamente alcalino	5.7	Alto	46.1
02TULA	58	26	16	Franco-arenosa	1.19	26	16	1.19	0.23	7.8	Medianamente alcalino	6.3	Muy alto	61
03TULA	54	32	14	Franco-arenosa	1.11	32	14	1.11	0.28	8.6	Fuertemente alcalino	6.7	Muy alto	67.4
04TULA	43	31	26	Franco	1.14	31	26	1.14	0.58	8.4	Medianamente alcalino	6.1	Medio	69.2
05TULA	28	36	36	Franco arcillosa	1.09	36	36	1.09	0.9	8.9	Fuertemente alcalino	6.7	Muy alto	77.4
06TULA	48	34	18	Franco	1.09	34	18	1.09	0.24	8.6	Fuertemente alcalino	7.7	Muy alto	64.9
07TULA	37	31	32	Franco-arcillosa	1.20	31	32	1.2	0.36	8.7	Fuertemente alcalino	4.2	Alto	68.8
08TULA	34	24	42	Arcilla	1.16	24	42	1.16	0.21	8.7	Fuertemente alcalino	5	Alto	44.1
09TULA	33	34	34	Franco-arcillosa	1.15	34	34	1.15	0.63	8.8	Fuertemente alcalino	5.4	Alto	73.1
10TULA	30	26	44	Arcilla	1.25	26	44	1.25	0.46	8.3	Medianamente alcalino	2.5	Medio	68.7
11TULA	40	38	22	Franco	1.22	38	22	1.22	0.44	7.4	Medianamente alcalino	4.4	Alto	69.5
12TULA	40	42	18	Franco	1.22	42	18	1.22	0.46	8.1	Medianamente alcalino	5.1	Alto	70.2
13TULA	18	34	48	Arcilla	1.28	34	48	1.28	0.07	8.4	Medianamente alcalino	5.1	Alto	68.7
14TULA	30	32	38	Franco-arcillosa	1.25	32	38	1.25	0.07	6.8	Neutro	5.6	Alto	40.8
15TULA	46	34	20	Franco	1.22	34	20	1.22	0.06	7.7	Medianamente alcalino	6.9	Muy alto	61.9
16TULA	28	38	34	Franco-arcillosa	1.25	38	34	1.25	0.1	8.7	Fuertemente alcalino	8	Muy alto	49.5
17TULA	36	30	34	Franco-arcillosa	1.23	30	34	1.23	0.07	8	Medianamente alcalino	7.6	Muy alto	58.8
18TULA	42	36	22	Franco	1.22	36	22	1.22	0.43	8.6	Fuertemente alcalino	9.6	Muy alto	70.4
19TULA	14	26	60	Arcilla	1.25	26	60	1.25	0.62	7.6	Medianamente alcalino	4.4	Alto	40.7
20TULA	50	28	22	Franco	1.19	28	22	1.19	0.39	8.9	Fuertemente alcalino	7.2	Muy alto	62.6
21TULA	52	28	20	Franco	1.25	28	20	1.25	0.33	8.3	Medianamente alcalino	5.1	Alto	70.6
22TULA	32	30	38	Franco-arcillosa	1.22	30	38	1.22	0.51	8.9	Fuertemente alcalino	5.5	Alto	76.3
23TULA	46	33	21	Franco	1.23	33	21	1.23	0.38	7.9	Medianamente alcalino	4.8	Alto	70
24TULA	22	28	50	Arcilla	1.25	28	50	1.25	0.35	8.1	Medianamente alcalino	3.8	Alto	77
25TULA	20	38	42	Arcilla	1.25	38	42	1.25	0.36	8.4	Medianamente alcalino	2.5	Medio	72.7
26TULA	16	30	54	Arcilla	1.19	30	54	1.19	0.23	7.4	Medianamente alcalino	3.8	Alto	59.6
27TULA	25	34	41	Arcilla	1.18	34	41	1.18	0.29	7.7	Medianamente alcalino	2.5	Medio	64.9
28TULA	44	30	26	Franco	1.25	30	26	1.25	0.43	8.8	Fuertemente alcalino	4.4	Alto	71.4
29TULA	29	34	37	Franco-arcillosa	1.18	34	37	1.18	0.16	7.8	Medianamente alcalino	5.3	Alto	53.3
30TULA	27	34	39	Franco-arcillosa	1.18	34	39	1.18	0.22	7.7	Medianamente alcalino	3.9	Alto	59.1
31TULA	30	30	40	Arcilla	1.11	30	40	1.11	0.22	6.9	Neutro	2.5	Medio	57
32TULA	34	28	38	Franco-arcillosa	1.19	28	38	1.19	0.23	8.8	Fuertemente alcalino	6.4	Muy alto	58.7
33TULA	56	24	20	Franco-arenosa	1.18	24	20	1.18	0.23	8.8	Fuertemente alcalino	7.4	Muy alto	59.7

Efectos despreciables de la salinidad

Muestra	Contenido de partículas			Textura	Densidad aparente g/cm ³	Saturación del suelo (gH ₂ O/g)	Capacidad de campo (gH ₂ O/g)	Punto de marchitamiento permanente (gH ₂ O/g)	Conductividad eléctrica (relación 2:1 agua:suelo)	pH (relación 2:1 agua:suelo) y Clase de alcalinidad	Materia orgánica total % Clase M.O.	Sumatoria de bases intercambiables cMolc/kg
	Arena %	Limo %	Arcilla %									
34TULA	36	38	26	Franco	1.11	38	26	1.11	0.24	8.7 Fuertemente alcalino	5.3 Alto	72.5
35TULA	12	44	44	Arcillo-limosa	1.11	44	44	1.11	0.2	8.7 Fuertemente alcalino	7.1 Muy alto	55.9
Rangos	12 - 58	24 - 44	14 - 60		1.09 - 1.28				0.06-0.9	6.9 - 8.9	2.5 - 9.6	40.7 - 77.4
			31.4%	<i>Franco</i>		<i>Bajo 20%</i>	<i>Bajo 25.7%</i>	<i>Bajo 14.3%</i>		5.7% <i>Neutro</i>	14.3% <i>Medio</i>	<i>Bajo 14.3%</i>
			28.6%	<i>Franco-arcillosa</i>		<i>Medio 57.1%</i>	<i>Medio 51.4%</i>	<i>Medio 62.9%</i>		51.4% <i>Medianamente alcalino</i>	51.4% <i>Alto</i>	<i>Medio 20.0%</i>
			25.7%	<i>Arcilla</i>		<i>Alto 22.9%</i>	<i>Alto 22.9%</i>	<i>Alto 22.9%</i>		42.9% <i>Fuertemente alcalino</i>	34.3% <i>Muy alto</i>	<i>Alto 65.7%</i>
			11.4%	<i>Franco-arenosa</i>								
			2.9%	<i>Arcillo-limosa</i>								

8.2.2. Contenido nutrimental del suelo

La cinética de reacción de los nutrientes y los factores que intervienen en los cambios químicos asociados a su disponibilidad en el suelo para ser absorbidos por los cultivos varía según el elemento que se trate, en cuanto a las formas del nitrógeno en el suelo se determinaron los contenidos de los iones nitrato y amonio ya que estos son absorbidos por los cultivos agrícolas para su nutrición, en este mismo apartado están los resultados obtenidos para Fósforo Olsen, Hierro, Manganeso, Zinc y Cobre.

Los resultados obtenidos para el contenido de nutrimentos del suelo analizado se presentan en la Cuadro 37, y más adelante se describe la interpretación de estos.

Cuadro 37 Contenido nutrimental del suelo (Nitrógeno inorgánico, Fósforo Olsen, Hierro, Manganeso, Zinc, Cobre)

Muestra	Nitrógeno inorgánico (amonio NH ₃ ⁺) mg/kg	Nitrógeno inorgánico (nitrato NO ₃ ⁻) mg/kg	Fósforo Olsen mg/kg	Hierro (Fe) mg/kg	Manganeso (Mn) mg/kg	Zinc (Zn) mg/kg	Cobre (Cu) mg/kg
01TULA	2	17	72	38.4	13.4	45.3	16.9
02TULA	2	24	56	22.9	5.8	21.5	6.8
03TULA	0	49	57	9.7	14.1	34.3	5.5
04TULA	10	38	52	12.3	6.5	11.6	3.6
05TULA	21	44	39	1.7	7.3	1.6	0.4
06TULA	6	49	64	8.3	9.8	32.8	6.4
07TULA	2	27	63	7.8	15.3	21	5.6
08TULA	2	14	67	13	21.5	11.8	2.9
09TULA	12	35	51	4.8	11.3	11.3	3
10TULA	1	14	32	7.9	12.2	7.5	3.6
11TULA	0	64	72	16.9	10.6	28	10.1
12TULA	0	27	86	17.6	8.5	26	17
13TULA	1	13	36	2.3	6.2	6.8	9.5
14TULA	4	14	58	9.2	17.3	24.2	34.3
15TULA	0	37	68	7.7	24.7	24.4	6.1
16TULA	3	17	127	51.1	23.9	80.7	19.2
17TULA	3	27	106	10.7	20.7	28	14.5
18TULA	7	63	184	28.5	17.3	74.3	19.1
19TULA	3	31	58	10.1	23.9	10.9	5
20TULA	5	16	80	10.7	8.3	6.3	1
21TULA	3	21	36	7.6	9.7	13.4	4.3
22TULA	9	10	49	3.1	5.2	5	1.5
23TULA	1	42	54	12.2	10.2	20.7	7.2
24TULA	2	24	49	3.5	9.3	5.1	2.4
25TULA	2	17	52	13.7	10.8	13.3	6.4
26TULA	2	13	48	9.5	26.4	4.1	2.1
27TULA	1	18	52	11.2	17.1	11.3	5.4
28TULA	1	27	33	2.6	8.7	1.5	0.3
29TULA	2	18	89	29.9	23.6	45	11.8
30TULA	2	18	70	20.6	20.3	28.1	8.6
31TULA	0	20	51	8.8	23.3	9.3	4.3

Muestra	Nitrógeno inorgánico (amonio NH ₃ ⁺) mg/kg	Nitrógeno inorgánico (nitrato NO ₃ ⁻) mg/kg	Fósforo Olsen mg/kg	Hierro (Fe) mg/kg	Manganeso (Mn) mg/kg	Zinc (Zn) mg/kg	Cobre (Cu) mg/kg
32TULA	2	23	47	6.4	15.5	19.2	5.6
33TULA	14	3	65	4.8	6.9	6.4	1.4
34TULA	0	19	42	5.5	6.8	28.9	1.6
35TULA	3	23	84	23.3	17.4	42.8	11.7

Fuente: Elaboración propia

La NOM-021-SEMARNAT-2000 contiene las interpretaciones para cada uno de los elementos analizados para este estudio y se presentan en la Cuadro 38 y Cuadro 39.

Cuadro 38 Clasificación de Nitrógeno inorgánico según la NOM-021-SEMARNAT-2000

Clase	N inorgánico en el suelo mg kg ⁻¹
Muy bajo	0 – 10
Bajo	10 – 20
Medio	20 – 40
Alto	40 – 60
Muy alto	> 60

Fuente: NOM-021-SEMARNAT-2000

Cuadro 39 Interpretación de los resultados obtenidos para los iones de nitrógeno y fósforo Olsen

Clase	Nitrógeno inorgánico (amonio NH ₃ ⁺) %	Nitrógeno inorgánico (nitrato NO ₃ ⁻) %	Fósforo Olsen %
Muy bajo	91.4	5.7	-
Bajo	5.7	40.0	-
Medio	2.9	37.1	-
Alto	-	11.4	100
Muy alto	-	5.7	-

Fuente: Elaboración propia

A pesar de la baja concentración de **nitrógeno inorgánico** (amonio y nitrato) encontrada en algunos de los terrenos estudiados, la cantidad de este nutriente aportada a través del agua de riego es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos que se producen en la zona hasta un cierto tope de rendimiento. El efecto de la calidad del agua sobre el maíz permite alcanzar una determinada biomasa y producción de grano, por lo que si se pretende llegar a rendimientos superiores es necesario complementar los aportes nutrimentales del riego con fertilizantes. Para el caso del fósforo Olsen siendo todos los

valores mayores a 11 mg/kg, como lo especifica la NOM-021-SEMARNAT-2000, deja a todos los resultados obtenidos en la clase “Alto”.

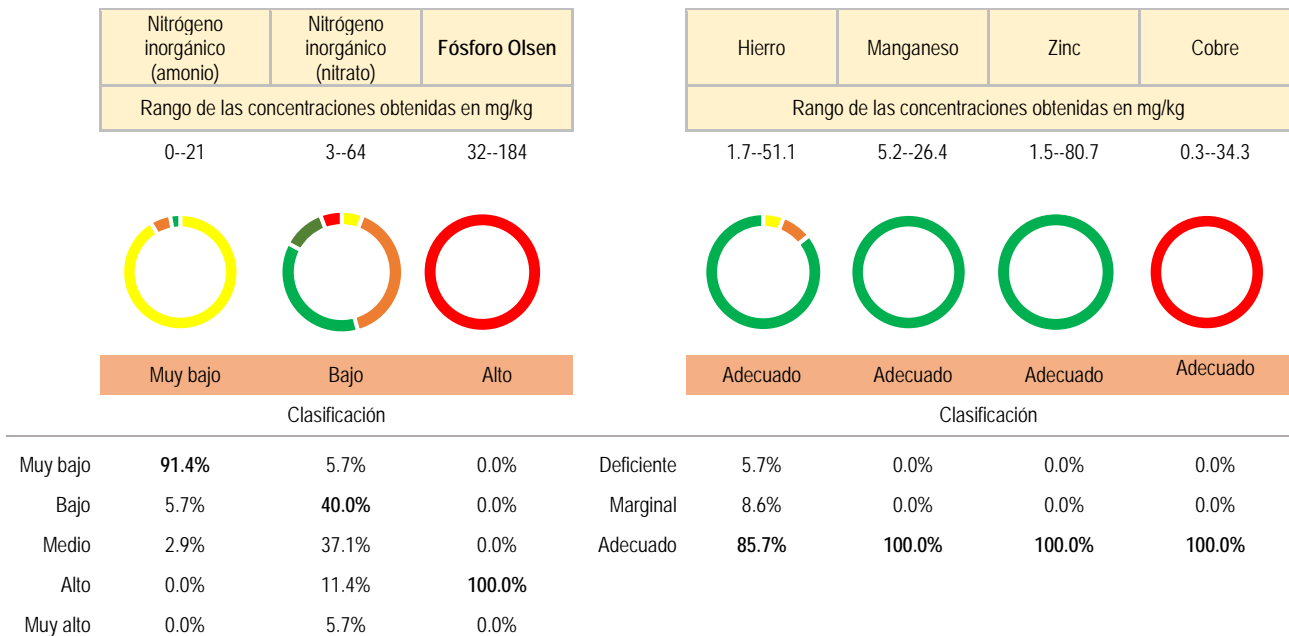
Cuadro 40 Interpretación de los resultados obtenidos para Hierro, Manganeso, Zinc y Cobre

Clase	Hierro %	Manganeso %	Zinc %	Cobre %
Deficiente	5.7	-	-	-
Marginal	8.6	-	-	-
Adecuado	85.7	100	100	100

Fuente: Elaboración propia

Los demás nutrientes encontrados que se clasificaron en la clase “Adecuado” (hierro, manganeso, zinc, cobre) no son limitantes para la producción de cultivos.

Cuadro 41 Concentraciones de los nutrientes en el suelo y su interpretación gráfica



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 42 Contenido nutrimental del suelo y su clasificación de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000

Muestra	Nitrógeno inorgánico (amonio NH ₃ ⁺)		Nitrógeno inorgánico (nitrato NO ₃ ⁻)		Fósforo Olsen		Hierro (Fe)		Manganeso (Mg)		Zinc (Zn)		Cobre (Cu)	
	mg/kg		mg/kg		mg/kg		mg/kg		mg/kg		mg/kg		mg/kg	
01TULA	2	Muy bajo	17	Bajo	72	Alto	38.4	Adecuado	13.4	Adecuado	45.3	Adecuado	16.9	Adecuado
02TULA	2	Muy bajo	24	Medio	56	Alto	22.9	Adecuado	5.8	Adecuado	21.5	Adecuado	6.8	Adecuado
03TULA	0	Muy bajo	49	Alto	57	Alto	9.7	Adecuado	14.1	Adecuado	34.3	Adecuado	5.5	Adecuado
04TULA	10	Muy bajo	38	Medio	52	Alto	12.3	Adecuado	6.5	Adecuado	11.6	Adecuado	3.6	Adecuado
05TULA	21	Medio	44	Alto	39	Alto	1.7	Deficiente	7.3	Adecuado	1.6	Adecuado	0.4	Adecuado
06TULA	6	Muy bajo	49	Alto	64	Alto	8.3	Adecuado	9.8	Adecuado	32.8	Adecuado	6.4	Adecuado
07TULA	2	Muy bajo	27	Medio	63	Alto	7.8	Adecuado	15.3	Adecuado	21	Adecuado	5.6	Adecuado
08TULA	2	Muy bajo	14	Bajo	67	Alto	13	Adecuado	21.5	Adecuado	11.8	Adecuado	2.9	Adecuado
09TULA	12	Bajo	35	Medio	51	Alto	4.8	Adecuado	11.3	Adecuado	11.3	Adecuado	3	Adecuado
10TULA	1	Muy bajo	14	Bajo	32	Alto	7.9	Adecuado	12.2	Adecuado	7.5	Adecuado	3.6	Adecuado
11TULA	0	Muy bajo	64	Muy alto	72	Alto	16.9	Adecuado	10.6	Adecuado	28	Adecuado	10.1	Adecuado
12TULA	0	Muy bajo	27	Medio	86	Alto	17.6	Adecuado	8.5	Adecuado	26	Adecuado	17	Adecuado
13TULA	1	Muy bajo	13	Bajo	36	Alto	2.3	Deficiente	6.2	Adecuado	6.8	Adecuado	9.5	Adecuado
14TULA	4	Muy bajo	14	Bajo	58	Alto	9.2	Adecuado	17.3	Adecuado	24.2	Adecuado	34.3	Adecuado
15TULA	0	Muy bajo	37	Medio	68	Alto	7.7	Adecuado	24.7	Adecuado	24.4	Adecuado	6.1	Adecuado
16TULA	3	Muy bajo	17	Bajo	127	Alto	51.1	Adecuado	23.9	Adecuado	80.7	Adecuado	19.2	Adecuado
17TULA	3	Muy bajo	27	Medio	106	Alto	10.7	Adecuado	20.7	Adecuado	28	Adecuado	14.5	Adecuado
18TULA	7	Muy bajo	63	Muy alto	184	Alto	28.5	Adecuado	17.3	Adecuado	74.3	Adecuado	19.1	Adecuado
19TULA	3	Muy bajo	31	Medio	58	Alto	10.1	Adecuado	23.9	Adecuado	10.9	Adecuado	5	Adecuado
20TULA	5	Muy bajo	16	Bajo	80	Alto	10.7	Adecuado	8.3	Adecuado	6.3	Adecuado	1	Adecuado
21TULA	3	Muy bajo	21	Medio	36	Alto	7.6	Adecuado	9.7	Adecuado	13.4	Adecuado	4.3	Adecuado
22TULA	9	Muy bajo	10	Muy bajo	49	Alto	3.1	Marginal	5.2	Adecuado	5	Adecuado	1.5	Adecuado
23TULA	1	Muy bajo	42	Alto	54	Alto	12.2	Adecuado	10.2	Adecuado	20.7	Adecuado	7.2	Adecuado
24TULA	2	Muy bajo	24	Medio	49	Alto	3.5	Marginal	9.3	Adecuado	5.1	Adecuado	2.4	Adecuado
25TULA	2	Muy bajo	17	Bajo	52	Alto	13.7	Adecuado	10.8	Adecuado	13.3	Adecuado	6.4	Adecuado
26TULA	2	Muy bajo	13	Bajo	48	Alto	9.5	Adecuado	26.4	Adecuado	4.1	Adecuado	2.1	Adecuado
27TULA	1	Muy bajo	18	Bajo	52	Alto	11.2	Adecuado	17.1	Adecuado	11.3	Adecuado	5.4	Adecuado
28TULA	1	Muy bajo	27	Medio	33	Alto	2.6	Marginal	8.7	Adecuado	1.5	Adecuado	0.3	Adecuado
29TULA	2	Muy bajo	18	Bajo	89	Alto	29.9	Adecuado	23.6	Adecuado	45	Adecuado	11.8	Adecuado
30TULA	2	Muy bajo	18	Bajo	70	Alto	20.6	Adecuado	20.3	Adecuado	28.1	Adecuado	8.6	Adecuado
31TULA	0	Muy bajo	20	Bajo	51	Alto	8.8	Adecuado	23.3	Adecuado	9.3	Adecuado	4.3	Adecuado
32TULA	2	Muy bajo	23	Medio	47	Alto	6.4	Adecuado	15.5	Adecuado	19.2	Adecuado	5.6	Adecuado
33TULA	14	Bajo	3	Muy bajo	65	Alto	4.8	Adecuado	6.9	Adecuado	6.4	Adecuado	1.4	Adecuado
34TULA	0	Muy bajo	19	Bajo	42	Alto	5.5	Adecuado	6.8	Adecuado	28.9	Adecuado	1.6	Adecuado
35TULA	3	Muy bajo	23	Medio	84	Alto	23.3	Adecuado	17.4	Adecuado	42.8	Adecuado	11.7	Adecuado
	Muy bajo	91.4%	Muy bajo	5.7%	Muy bajo	-	Deficiente	5.7%	Deficiente	-	Deficiente	-	Deficiente	-
	Bajo	5.7%	Bajo	40.0%	Bajo	-	Marginal	8.6%	Marginal	-	Marginal	-	Marginal	-
	Medio	2.9%	Medio	37.1%	Medio	-	Adecuado	85.7%	Adecuado	100%	Adecuado	100%	Adecuado	100%
	Alto	-	Alto	11.4%	Alto	100%								
	Muy alto	-	Muy alto	5.7%	Muy alto	-								
Rangos de concentración	0 - 21		3 - 64		32 - 184		1.7 - 51.1		5.2 - 26.4		1.5 - 80.7		0.3 - 34.3	

Fuente: Elaboración propia

8.2.3. Elementos no esenciales potencialmente tóxicos

Para los análisis obtenidos de elementos no esenciales potencialmente tóxicos (Cuadro 46), no se encontraron concentraciones dañinas a los cultivos según la NOM-021-SEMARNAT-2000 y la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004.

Cuadro 43 Valores sugeridos de elementos tóxicos en el suelo según la tolerancia de los cultivos NOM-021-SEMARNAT-2000

Clase	Cadmio	Plomo	Níquel
		mg kg ⁻¹	
Normal	0.35	35	50
Peligroso	3 - 5	100 - 300	100

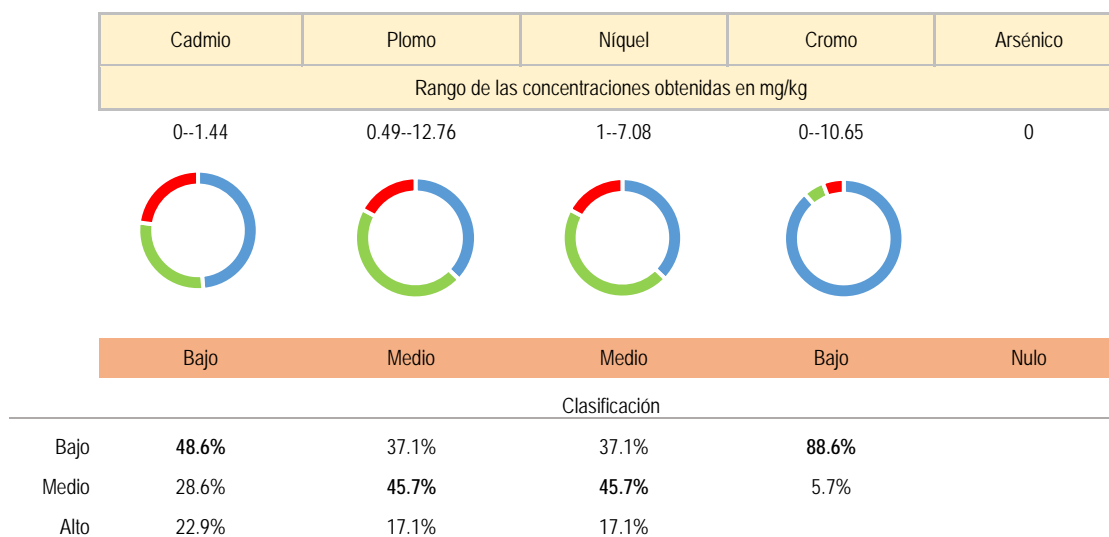
Las muestras analizadas en relación con los valores sugeridos de elementos tóxicos en el suelo según la tolerancia de los cultivos para cadmio, plomo y níquel se evalúan con clase normal y peligrosa. Sólo 10 de las muestras analizadas para cadmio, presentan valores menores a 0.35 que es clase normal, las demás muestras están entre 0.37 y 1.44 quedando fuera del rango normal pero sin llegar a ser tóxico. Para plomo y níquel todos los datos se encuentran en la clase normal.

Cuadro 44 Concentraciones de referencia total por tipo de uso de suelo agrícola NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004

Contaminante	Concentraciones de referencia total por tipo de uso de suelo agrícola
Cromo	280 mg/kg
Arsénico	220 mg/kg

Con base en la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004, si la concentración de un elemento químico se encuentra por encima de un valor de referencia, se considera existe riesgo de que se generen efectos adversos para la salud. Las concentraciones de referencia total por tipo de uso de suelo agrícola son de 280 mg/kg y 22 mg/kg para cromo y arsénico. Los resultados obtenidos (Cuadro 46) no muestran a estos elementos como tóxicos en el suelo del DR003-Tula, y cabe señalar que el arsénico no fue detectado en el análisis y en cuanto a cromo ninguna muestra llega a rebasar la concentración de referencia.

Cuadro 45 Elementos no esenciales potencialmente tóxicos



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 46 Contenido de elementos potencialmente tóxicos por muestra de suelo

Muestra	Cadmio (Cd) mg/kg	Plomo (Pb) mg/kg	Níquel (Ni) mg/kg	Cromo (Cr) mg/kg	Arsénico (As) mg/kg		
01TULA	1.08	9.41	Normal todos	6.29	Normal todos	0.05	0.00
02TULA	0.37	3.24	Bajo 35	4.39	Bajo 50	0.00	0.00
03TULA	0.72	5.65		5.14		0.00	0.00
04TULA	0.40	3.10		2.46		0.00	0.00
05TULA	0.00	Normal	1.78	0.52		0.00	0.00
06TULA	0.76	6.46		5.06		0.00	0.00
07TULA	0.80	6.10		4.20		0.02	0.00
08TULA	0.31	Normal	4.83	3.22		0.00	0.00
09TULA	0.40	3.94		2.36		0.01	0.00
10TULA	0.40	3.65		1.74		0.03	0.00
11TULA	0.70	7.17		2.72		0.04	0.00
12TULA	1.03	12.76		5.23		0.06	0.00
13TULA	0.45	0.91		0.04		3.50	0.00
14TULA	1.10	4.79		0.03		10.65	0.00
15TULA	0.92	4.48		0.04		6.17	0.00
16TULA	1.44	11.94		7.08		0.00	0.00
17TULA	1.27	4.56		0.06		10.07	0.00
18TULA	1.26	12.20		5.21		0.00	0.00
19TULA	0.44	10.48		2.79		0.00	0.00
20TULA	0.00	Normal	1.52	1.39		0.00	0.00
21TULA	0.50	5.92		2.57		0.02	0.00
22TULA	0.00	Normal	4.28	0.20		0.00	0.00
23TULA	0.60	6.54		2.65		0.03	0.00
24TULA	0.33	Normal	2.82	1.23		0.00	0.00
25TULA	0.06	Normal	4.29	1.70		0.03	0.00
26TULA	0.23	Normal	4.72	1.59		0.01	0.00
27TULA	0.23	Normal	5.58	2.03		0.02	0.00
28TULA	0.10	Normal	0.49	0.46		0.00	0.00
29TULA	0.92	9.41		4.72		0.01	0.00
30TULA	0.58	7.50		3.38		0.01	0.00
31TULA	0.41	6.88		2.36		0.01	0.00

Muestra	Cadmio (Cd) mg/kg	Plomo (Pb) mg/kg	Níquel (Ni) mg/kg	Cromo (Cr) mg/kg	Arsénico (As) mg/kg
32TULA	0.73	6.55	2.32	0.00	0.00
33TULA	0.00 Normal	2.47	2.43	0.00	0.00
34TULA	1.01	6.47	1.81	0.00	0.00
35TULA	1.01	8.45	3.47	0.00	0.00
Rangos	0 – 1.44 Normal 0.35	0.49 - 12.76 Normal 35	0.03 – 7.08 Normal 50	0 – 10.65 Concentración de referencia	0 - 0 Concentración de referencia

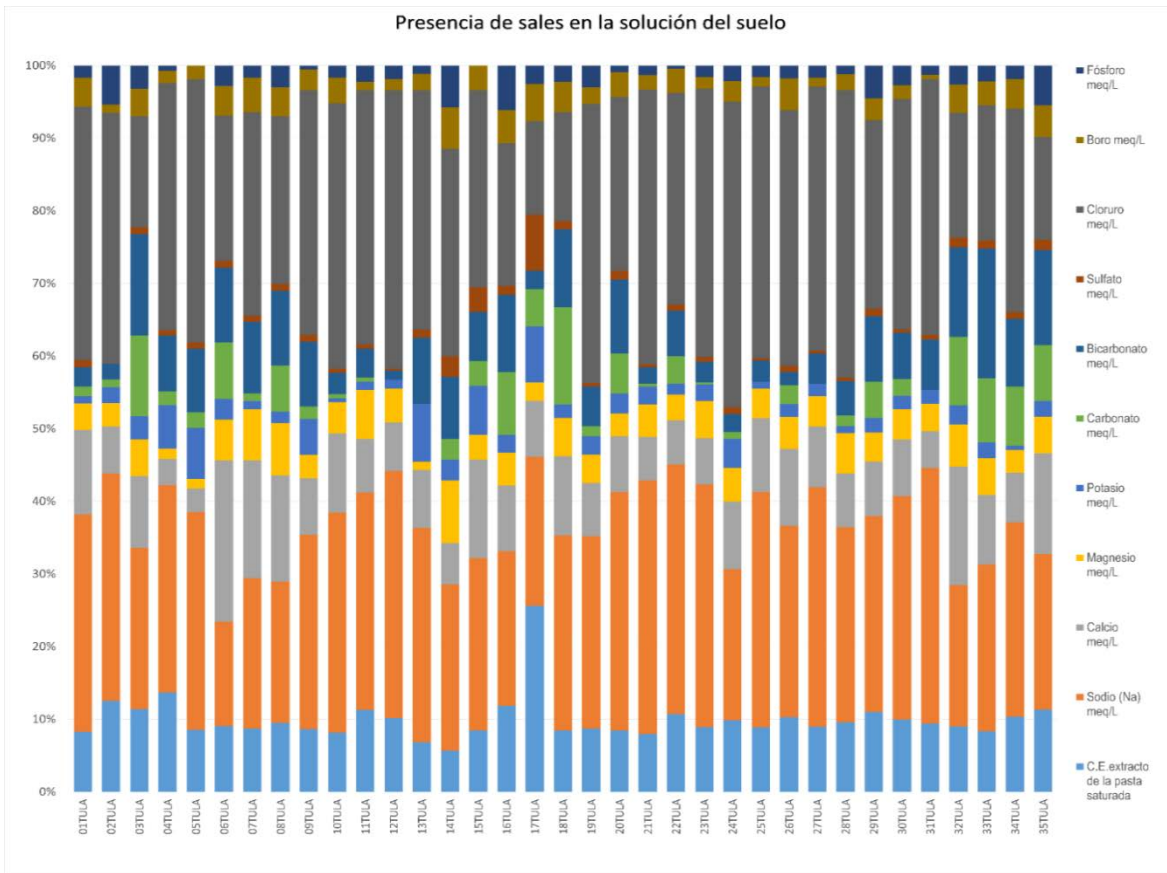
Fuente: Elaboración propia

8.2.4. Presencia de sales en la solución del suelo

El contenido de sales cambia en función de la humedad del suelo. Por ello, durante el estiaje aumenta la cristalización y las sales en solución disminuyen aunque la solución se concentra y aumentan las adsorbidas, mientras que durante las épocas húmedas (por lluvia o irrigación) se invierte lo aquí indicado. Las sales más tóxicas son las que presentan mayor solubilidad porque originan soluciones muy concentradas. En contraste, las sales con baja solubilidad no representan problemas porque precipitan antes de alcanzar niveles perjudiciales a los cultivos.

De acuerdo a la gráfica ilustrativa sobre la distribución de los elementos encontrados en la solución del suelo se logra observar como el cloruro y sodio son más predominantes, lo cual se puede deber al riego con las aguas residuales ya que una característica de estas es su alcalinidad.

Analizando la composición de las sales de estos suelos, se puede mencionar que la predominancia de sales son los cloruros y el sodio, ya que estos son los elementos de más alta concentración (de entre 0 – 26 meq/L Cl⁻ y 21 meq/L Na⁺), con ayuda de la Gráfica 1 de columna apilada se observa que las concentraciones de las sales tienen el siguiente orden de concentración: carbonato > calcio > bicarbonato > potasio > magnesio > boro > fosforo > sulfato (concentraciones de entre 0 – 7.1 meq/L) que pueden presentar un comportamiento muy variable, por cambios estacionales en relación con la precipitación y movilidad por su disociación de dichos elementos pueden existir algunas sales más en el suelo.



Gráfica 1 Presencia de sales en la solución del suelo

Cuadro 47 Contenido de sales en la solución del suelo

Muestra	C.E. en extracto de la pasta saturada		Cloruro (Cl ⁻)	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	Calcio (Ca ²⁺)	Magnesio (Mg ²⁺)	Sodio (Na ⁺)	Potasio (K ⁺)	Carbonato (CO ₃ ²⁻)	Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	Boro (B)	Fósforo (P)
	Clase	Valor	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L
01TULA	Moderadamente salino	2.50	10.5	0.3	3.5	1.1	9.0	0.3	0.4	0.8	1.2	0.5
02TULA	Ligeramente salino	1.16	3.2	0	0.6	0.3	2.9	0.2	0.1	0.2	0.1	0.5
03TULA	Moderadamente salino	3.58	4.8	0.3	3.1	1.6	7.0	1.0	3.5	4.4	1.2	1
04TULA	Suelo salino	5.70	14.2	0.3	1.5	0.6	11.9	2.5	0.8	3.2	0.7	0.3
05TULA	Suelo salino	5.96	25.3	0.6	2.3	0.9	20.9	4.9	1.5	6.1	1.3	0
06TULA	Moderadamente salino	2.90	6.4	0.3	7.1	1.8	4.6	0.9	2.5	3.3	1.3	0.9
07TULA	Moderadamente salino	3.10	10	0.3	5.8	2.5	7.4	0.4	0.4	3.5	1.7	0.6
08TULA	Moderadamente salino	3.14	7.6	0.3	4.8	2.4	6.4	0.5	2.1	3.4	1.3	1
09TULA	Suelo salino	4.53	17.7	0.5	4.1	1.7	14.1	2.6	0.9	4.7	1.5	0.3
10TULA	Moderadamente salino	3.00	13.5	0.2	4.0	1.6	11.2	0.2	0.2	1.1	1.3	0.6
11TULA	Ligeramente salino	2.00	6.2	0.1	1.3	1.2	5.3	0.2	0.1	0.7	0.2	0.4
12TULA	Moderadamente salino	3.30	12.5	0.1	2.2	1.5	11.1	0.4	0	0.4	0.5	0.6
13TULA	Efectos despreciables de la salinidad	0.60	2.9	0.1	0.7	0.1	2.6	0.7	0	0.8	0.2	0.1
14TULA	Efectos despreciables de la salinidad	0.20	1	0.1	0.2	0.3	0.8	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2
15TULA	Efectos despreciables de la salinidad	0.25	0.8	0.1	0.4	0.1	0.7	0.2	0.1	0.2	0.1	0
16TULA	Moderadamente salino	2.89	4.8	0.3	2.2	1.1	5.2	0.6	2.1	2.6	1.1	1.5
17TULA	Efectos despreciables de la salinidad	1.00	0.5	0.3	0.3	0.1	0.8	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1
18TULA	Suelo salino	4.48	8	0.6	5.8	2.8	14.3	1.0	7.1	5.7	2.2	1.2
19TULA	Moderadamente salino	3.80	16.8	0.2	3.2	1.7	11.6	1.1	0.6	2.4	1	1.3
20TULA	Moderadamente salino	2.74	7.8	0.4	2.5	1.0	10.7	0.9	1.8	3.3	1.1	0.3
21TULA	Moderadamente salino	3.60	17	0.2	2.7	2.0	15.7	1.1	0.2	1	0.9	0.6
22TULA	Suelo salino	5.10	13.9	0.4	2.9	1.7	16.4	0.7	1.8	3	1.6	0.2
23TULA	Moderadamente salino	2.80	11.6	0.2	2.0	1.6	10.5	0.7	0.1	0.9	0.5	0.5
24TULA	Moderadamente salino	3.20	13.6	0.3	3.0	1.5	6.7	1.3	0.3	0.8	0.9	0.7
25TULA	Moderadamente salino	2.80	11.8	0.1	3.2	1.3	10.2	0.3	0	0.9	0.4	0.5
26TULA	Ligeramente salino	1.17	4	0.1	1.2	0.5	3.0	0.2	0.3	0.2	0.5	0.2
27TULA	Moderadamente salino	2.15	8.7	0.1	2.0	1.0	7.9	0.4	0	1	0.3	0.4
28TULA	Moderadamente salino	4.00	16.5	0.2	3.1	2.3	11.2	0.4	0.6	2	0.9	0.5
29TULA	Moderadamente salino	2.20	5.2	0.2	1.5	0.8	5.4	0.4	1	1.8	0.6	0.9
30TULA	Moderadamente salino	2.17	6.9	0.1	1.7	0.9	6.7	0.4	0.5	1.4	0.4	0.6
31TULA	Ligeramente salino	1.50	5.6	0.1	0.8	0.6	5.6	0.3	0	1.1	0.1	0.2
32TULA	Moderadamente salino	2.77	5.3	0.4	5.0	1.8	6.0	0.8	2.9	3.8	1.2	0.8
33TULA	Moderadamente salino	2.29	5.1	0.3	2.6	1.4	6.3	0.6	2.4	4.9	0.9	0.6
34TULA	Moderadamente salino	3.31	9	0.3	2.2	1.0	8.6	0.2	2.6	3	1.3	0.6
35TULA	Moderadamente salino	3.12	3.9	0.4	3.8	1.4	5.9	0.6	2.1	3.6	1.2	1.5
Rango de las concentraciones		0--6.0	0--26	0--0.6	0--7	0--3	0--21	0--5.5	0--7.1	0--6	0--2.2	0--1.5
Bajo		20.0%	57.1%	31.4%	60.0%	31.4%	45.7%	91.4%	94.3%	54.3%	42.9%	37.1%
Medio		65.7%	40.0%	60.0%	31.4%	8.6%	40.0%	5.7%	2.9%	31.4%	51.4%	51.4%
Alto		14.3%	2.9%	8.6%	8.6%	60.0%	14.3%	2.9%	2.9%	14.3%	5.7%	11.4%

Fuente: Elaboración propia

8. 3. Contenido de nutrientes y elementos potencialmente tóxicos en el tejido vegetal

Las plantas cultivadas requieren de nutrientes para su crecimiento y desarrollo, a través de la aplicación de insumos de nutrición vegetal y el riego, como ocurre en el Valle del Mezquital en el cual el uso de las aguas negras significa un gran aporte de nutrimentos para los cultivos.

Los organismos vegetales forman un sistema abierto que está conectado con su medio que influye en ambas direcciones mediante un intercambio permanente de materia y energía. Así, las plantas incrementan su biomasa por la absorción de dióxido de carbono del aire, la energía del sol y los nutrientes que adquieren del medio edáfico. De los más de 100 elementos químicos que existen, sólo 17 son esenciales para las plantas, esto es, en ausencia de cualquiera de ellos no sería factible que completen su ciclo vital, porque estos elementos están implicados en funciones de crecimiento y reproducción indispensables para su supervivencia y no son reemplazables por otros para suplir sus funciones.

Algunos de los elementos esenciales no son minerales y son adquiridos por la planta del aire o del agua. Los elementos esenciales minerales se clasifican como macro y micronutrientes por la concentración en la que se encuentran en el tejido vegetal, pero no por ello dejan de ser fundamentales dentro del metabolismo de las plantas. La agrupación de los distintos elementos esenciales es como sigue: macro-nutrientes primarios: nitrógeno, fósforo y potasio; macro-nutrientes secundarios; calcio, magnesio y azufre; micro-nutrientes: boro, cloro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, níquel y zinc.

Desde el punto de vista nutricional, es común que el nitrógeno y fósforo se consideren como los principales elementos limitantes del crecimiento y desarrollo, que afectan el rendimiento económico de los cultivos en la mayoría de las zonas agrícolas del país; situación que no ocurre en el Valle del Mezquital por el aporte de estos nutrientes en el agua negra que se emplea de manera habitual como fuente de riego; sin embargo, esto también tiene un límite dado por diversas situaciones como son la concentración de los

nutrientes en el agua negra, cantidad y frecuencia del riego, eficiencia con la que el cultivo absorbe los nutrientes y condiciones climáticas.

La relación entre los elementos químicos (macro-nutrientes y micro-nutrientes) en el tejido y la cantidad de biomasa vegetal resultó ser significativa. Esto indica que no hubo limitaciones en el rendimiento del cultivo, en este caso alfalfa, como consecuencia de algún tipo de desorden nutrimental, ya sea por exceso o déficit, ni tampoco un efecto fitotóxico por la absorción de elementos químicos.

8.3.1. Concentración macro-nutrientes

Con la finalidad de cumplir con la cuantificación de los macro-nutrientes, se realizó el muestreo y análisis del tejido vegetal en la zona de estudio para 35 muestras, cuyos resultados se presentan a continuación.

Cuadro 48 Concentración de macro-nutrientes en el tejido vegetal

Muestra	Macro-nutrientes Primarios			Macro-nutrientes Secundarios		
	Nitrógeno (N) %	Fósforo (P) %	Potasio (K) %	Calcio (Ca) %	Magnesio (Mg) %	Azufre (S) %
01TULA	2.20	0.41	2.00	2.00	0.07	0.32
02TULA	1.80	0.36	3.60	2.10	0.08	0.32
03TULA	2.60	0.37	3.00	3.50	0.45	0.30
04TULA	2.00	0.43	4.10	3.50	0.34	0.20
05TULA	2.60	0.27	3.70	1.60	0.30	0.30
06TULA	1.90	0.37	4.40	1.40	0.30	0.35
07TULA	2.90	0.46	2.40	2.40	0.06	0.30
08TULA	2.40	0.45	4.10	2.80	0.41	0.28
09TULA	2.00	0.39	3.60	2.80	0.44	0.28
10TULA	2.30	0.46	2.40	2.30	0.08	0.36
11TULA	2.90	0.34	2.60	2.40	0.63	0.30
12TULA	2.20	0.55	3.80	4.20	0.63	0.25
13TULA	1.40	0.45	3.80	2.00	0.36	0.33
14TULA	1.50	0.25	1.90	1.90	0.13	0.24
15TULA	2.50	0.64	4.00	2.20	0.19	0.25
16TULA	1.70	0.31	2.40	3.80	0.13	0.51
17TULA	2.10	0.37	3.20	2.10	0.36	0.35
18TULA	2.60	0.25	3.10	1.60	0.60	0.28
19TULA	1.20	0.79	2.20	2.40	0.03	0.15
20TULA	3.60	0.29	3.80	1.90	0.33	0.33
21TULA	2.40	0.42	3.60	5.50	0.69	0.30
22TULA	2.30	0.28	4.30	1.90	0.65	0.41
23TULA	2.30	0.38	3.80	2.00	0.09	0.23
24TULA	2.00	0.23	1.70	2.40	0.14	0.45
25TULA	3.50	0.23	3.90	1.60	0.43	0.43
26TULA	1.80	0.24	2.30	2.40	0.12	0.25
27TULA	1.60	0.40	3.80	2.10	0.09	0.29
28TULA	2.40	0.46	2.80	2.00	0.07	0.24

Muestra	Macro-nutrientes Primarios			Macro-nutrientes Secundarios		
	Nitrógeno (N) %	Fósforo (P) %	Potasio (K) %	Calcio (Ca) %	Magnesio (Mg) %	Azufre (S) %
29TULA	2.20	0.30	3.70	2.70	0.53	0.37
30TULA	2.10	0.33	2.30	2.20	0.15	0.20
31TULA	2.20	0.28	2.90	2.40	0.13	0.35
32TULA	2.80	0.34	4.00	2.80	0.50	0.31
33TULA	2.60	0.26	4.80	1.50	0.30	0.36
34TULA	2.20	0.56	3.80	3.60	0.51	0.25
35TULA	2.50	0.41	2.60	2.40	0.07	0.32
Rangos	2--3	0.40--0.60	3--4	3--4.5	0.25--0.50	0.30--0.40
Bajo	22.9%	60.0%	40.0%	82.9%	45.7%	40.0%
Medio	71.4%	34.3%	45.7%	14.3%	34.3%	48.6%
Alto	5.7%	5.7%	14.3%	2.9%	20.0%	11.4%

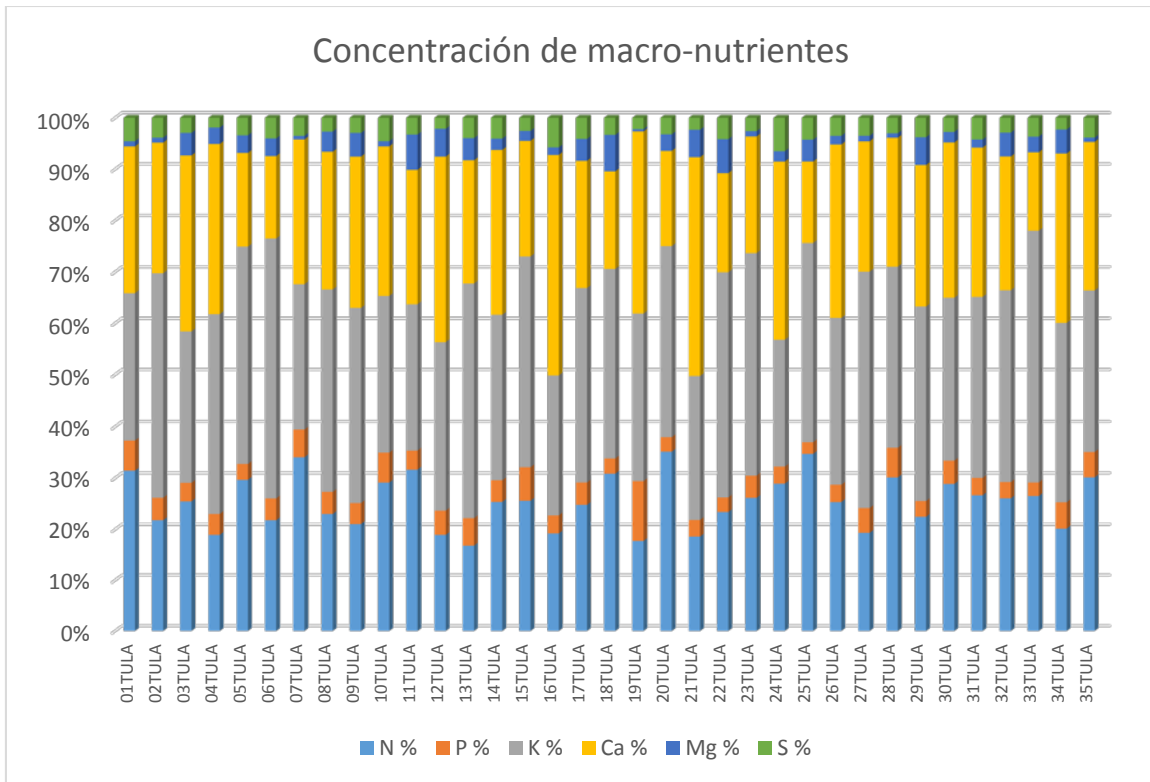
Fuente: Elaboración propia

Con el fin de analizar los resultados obtenidos (Cuadro 49), ante la carencia de una guía publicada para la clasificación de los macro-nutrientes, en este estudio se propone una clasificación con los valores mínimos y máximos de cada elemento analizado, para conocer la tendencia de las concentraciones; se obtuvieron tres clases: bajo, medio y alto. La tendencia encontrada es de clase *bajo* para fosforo, calcio y magnesio; y de clase *media* para nitrógeno, potasio y azufre.

Cuadro 49 Macro-nutrientes y su rango de concentraciones fito-tóxicas obtenidas para lo muestreado

Rango de valores obtenidos	Macro-nutrientes valores en porcentaje (%)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
2--3	0.40--0.60	3--4	3--4.5	0.25--0.50	0.30--0.40	
Distribución elaborada de acuerdo a los rangos obtenidos						
Tendencia	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Medio

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 2 Concentración de macro-nutrientes

De acuerdo a la Gráfica 2 las concentraciones de mayor incidencia para las muestras son para nitrógeno, calcio y potasio; las concentraciones menos frecuentes fueron para fósforo, magnesio y azufre. Aunque la tendencia de concentración de azufre es media, los valores que presenta de 0.3% a 0.4% son considerados bajos con respecto a los demás elementos. Y con respecto al calcio que presenta tendencia baja, cuenta con concentraciones de entre 3% y 4.5%, similares a fósforo, potasio y nitrógeno.

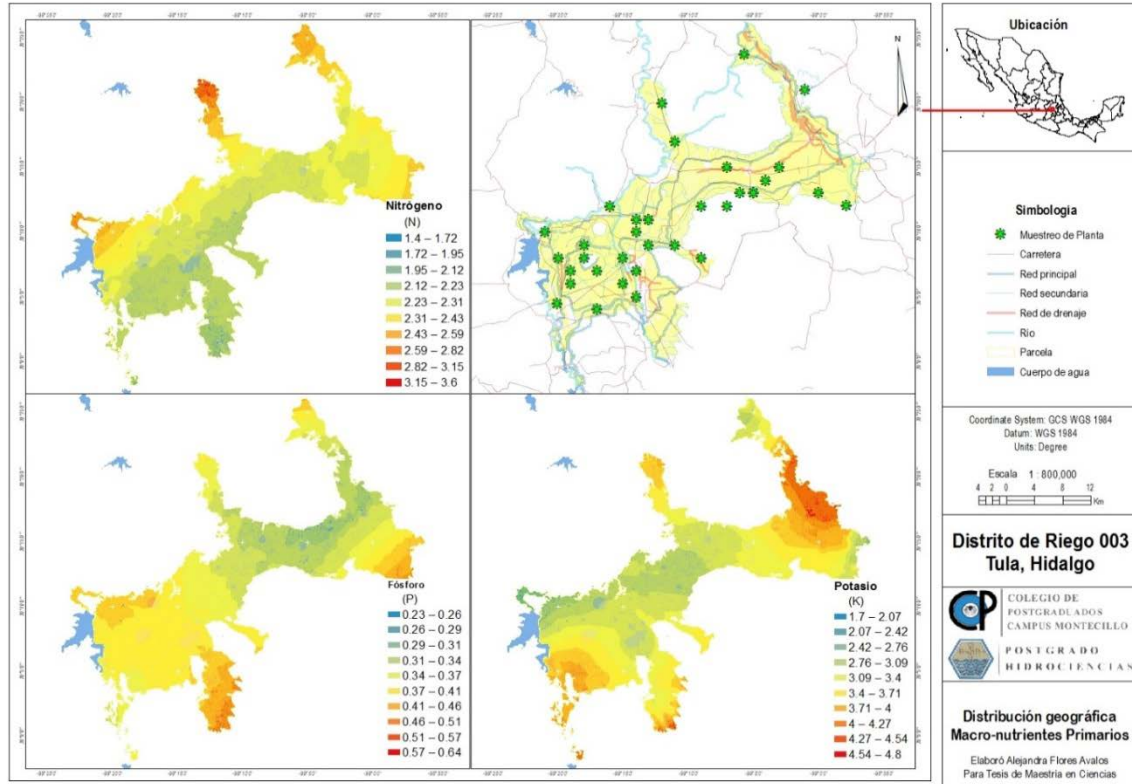


Figura 22 Distribución geoespacial de los Macro-nutrientes Primarios

Con los ejemplos de distribución geográfica de los macro-nutrientes (Figura 22 y Figura 23) se puede observar que en las orillas del DR003-Tula existe mayor concentración de macro-nutrientes primarios, coincidiendo con la ubicación de los módulos de riego: Actopan al noreste, Endhó-Xochitlán en el nor-centro, el Tlamaco-Juandho al sur-oeste y el Gamagaox de lado oeste cercano a la presa Endhó. En cuanto a los macro-nutrientes secundarios las concentraciones máximas y mínimas se encuentran en los módulos de riego antes mencionados.

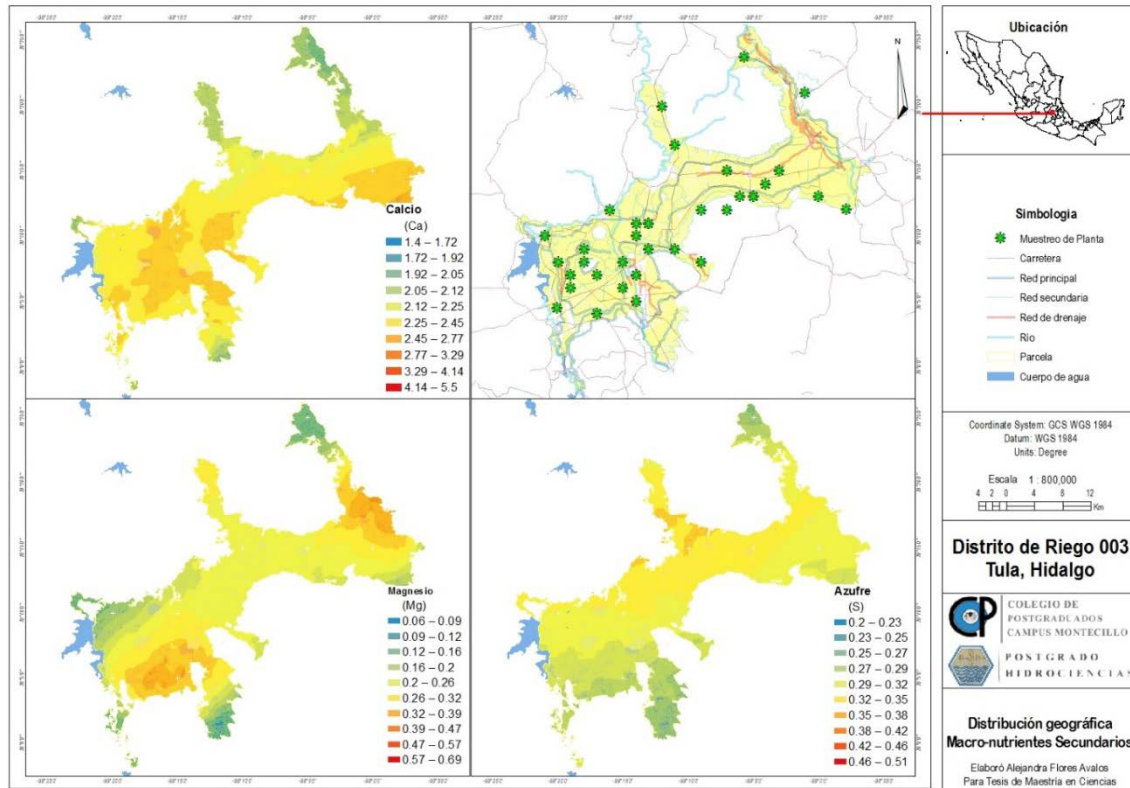


Figura 23 Distribución geoespacial de los Macro-nutrientes Secundarios

8.3.2. Concentración de micro-nutrientes

La disponibilidad de los **micronutrientes** es esencial para el adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas y para obtener rendimientos elevados. Cuando existe deficiencia de uno o varios elementos menores, el crecimiento y de la producción disminuyen, aunque existan cantidades adecuadas de los otros nutrientes. Salvo para esta situación los micro-nutrientes superaron la cantidad requerida y no causaron daño tóxico, de acuerdo a la clasificación propuesta en el presente estudio con los datos mínimos y máximos de la concentración de cada elemento, se detectó que la mayoría de las concentraciones se encuentran en la clase baja, salvo el boro que se encontró en la clase media con más del cincuenta por ciento y con clase baja con el cuarenta por ciento.

La clasificación propuesta en el presente estudio (Cuadro 50) tuvo el objetivo de mostrar que aunque hay concentraciones elevadas éstas son pocas, lo cual no significa que haya

excesos en general, más bien la frecuencia de la concentración fue baja, de casi el 50% hasta el 80% de lo muestreado. Estos datos se pueden observar al final del Cuadro 51.

Cuadro 50 Micro-nutrientes y su rango de concentraciones fito-toxicas obtenidas para lo muestreado

Rango de valores obtenidos	Micro-nutrientes valores en mg/kg				
	Fe	Cu	Mn	Zn	B
	125--200	9--15	70--120	50--80	35--60
Distribución elaborada de acuerdo a los rangos obtenidos					
Tendencia	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio

Fuente: Elaboración propia

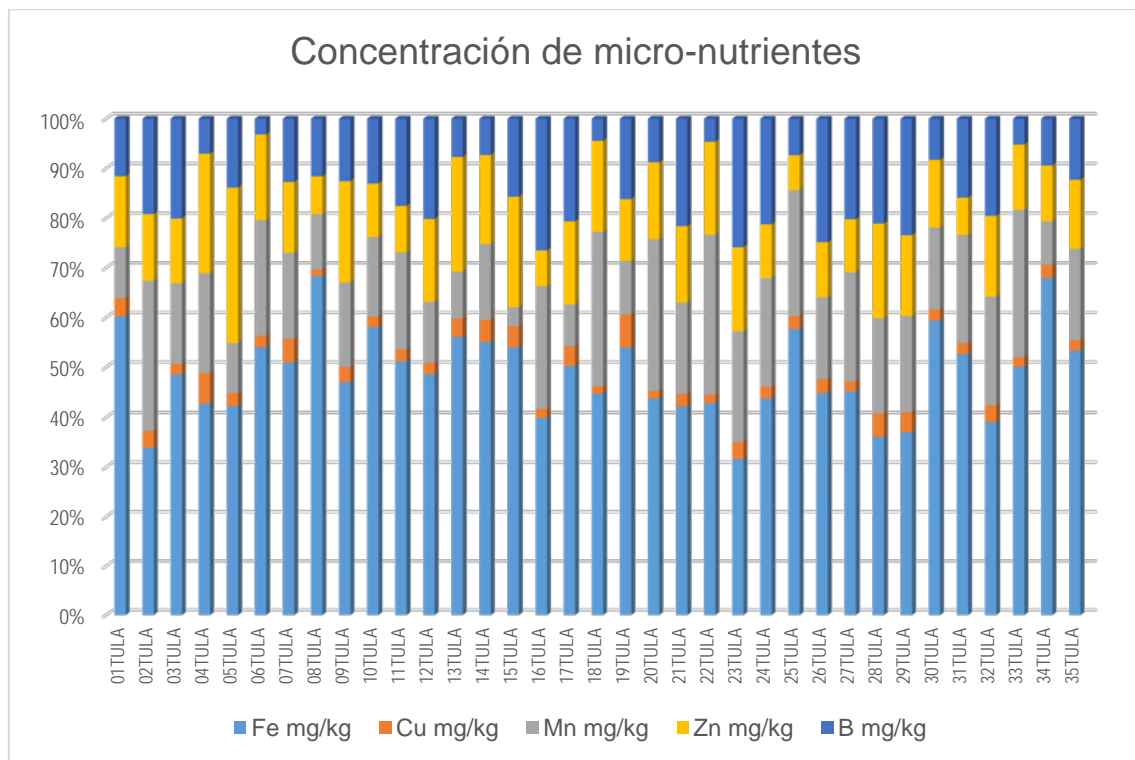
Cuadro 51 Concentración de micro-nutrientes en el tejido vegetal

Muestra	Hierro (Fe) mg/kg	Cobre (Cu) mg/kg	Manganeso (Mn) mg/kg	Zinc (Zn) mg/kg	Boro (B) mg/kg
01TULA	177	10.9	30	42	34
02TULA	53	5.4	47	21	30
03TULA	138	5.8	46	37	57
04TULA	146	20.9	68	82	24
05TULA	119	7.3	28	88	39
06TULA	204	8.9	88	65	12
07TULA	100	9.4	34	28	25
08TULA	306	6	50	34	52
09TULA	150	9.4	54	65	40
10TULA	178	6.6	49	33	40
11TULA	181	8.5	69	33	62
12TULA	111	4.9	28	38	46
13TULA	226	15	38	93	31
14TULA	83	6.7	23	27	11
15TULA	141	11.2	10	58	41
16TULA	122	5.6	75	22	81
17TULA	90	7.2	15	30	37
18TULA	181	6	125	74	18
19TULA	130	16.1	26	30	39
20TULA	85	3	59	30	17
21TULA	88	5.3	38	32	45
22TULA	250	9.9	187	109	27
23TULA	60	6.4	42	32	49
24TULA	101	5.5	50	25	49
25TULA	228	10.3	100	28	29
26TULA	85	5.2	31	21	47
27TULA	85	3.8	41	20	38
28TULA	53	6.9	28	28	31
29TULA	98	10.5	51	43	62
30TULA	122	4.5	34	28	17

Muestra	Hierro (Fe) mg/kg	Cobre (Cu) mg/kg	Manganeso (Mn) mg/kg	Zinc (Zn) mg/kg	Boro (B) mg/kg
31TULA	126	5.4	52	18	38
32TULA	108	9.4	60	45	54
33TULA	164	6.4	97	43	17
34TULA	296	11.7	38	49	41
35TULA	165	6.4	57	43	38
Rango de las concentraciones	125--200	9--15	70--120	50--80	35--60
Bajo	48.6%	65.7%	82.9%	77.1%	40.0%
Medio	34.3%	28.6%	11.4%	11.4%	51.4%
Alto	17.1%	5.7%	5.7%	11.4%	8.6%

Fuente: Elaboración propia

Con apoyo de la Gráfica 3 de columna apilada se puede observar la distribución de la concentración de los elementos, de mayor a menor: hierro > manganeso > zinc > boro > cobre. El hierro es dominante por su alta concentración en el tejido vegetal y aunque excedió la cantidad requerida no afectó negativamente a la biomasa; en cuanto a manganeso, zinc, y boro, fueron inferiores considerando sus concentraciones las cuales fueron aproximadamente la mitad de la del hierro. Para el cobre las concentraciones fueron de casi el 10% con respecto al hierro, siendo el elemento de concentración más bajo de todos.



Gráfica 3 Concentración de micro-nutrientes

8.3.3. Concentración de elementos no esenciales potencialmente tóxicos

Las concentraciones en exceso de un elemento no esencial en la planta son peligrosas, ya que pueden ocasionar toxicidad a la planta. Los resultados obtenidos se muestran en la Cuadro 52. Lo mismo ocurre cuando se trata de un nutriente y que su concentración después de cierto límite puede convertirle en un elemento tóxico.

El concepto de toxicidad se puede definir por la presencia de los llamados “metales pesados” y también cuando los nutrientes rebasan los límites máximos de tolerancia. Más aún, bajo ciertas circunstancias, la relación entre elementos o en su interacción con el medio edáfico puede generar sinergia toxicológica que agrava los efectos nocivos de los elementos en discusión.

Cuadro 52 Concentración de elementos no esenciales potencialmente tóxicos

Muestra	N-NO3 mg/kg	Sodio (Na) %	Arsénico (As) mg/kg	Cadmio (Cd) mg/kg	Plomo (Pb) mg/kg	Cromo (Cr) mg/kg	Níquel (Ni) mg/kg
01TULA	2,651	9.11	0	0.00	0	3.1	1.3
02TULA	2,179	3.61	0	0.00	0	0.5	0.9
03TULA	1,846	0.24	0	0.50	0	2.8	1.8
04TULA	1,511	0.30	0	0.00	0	1.0	2.8
05TULA	1,620	0.10	0	3.95	0	5.0	2.8
06TULA	2,438	0.30	0	3.10	0	2.0	2.3
07TULA	4,149	1.65	0	0.00	0	1.5	1.3
08TULA	1,144	0.18	0	0.00	0	1.5	4.9
09TULA	2,126	0.10	0	1.53	0	2.2	3.1
10TULA	4,896	6.99	0	0.00	0	1.5	5.4
11TULA	4,718	0.40	0	0.20	0	4.4	3.7
12TULA	625	0.14	0	1.40	0	2.0	5.4
13TULA	622	0.40	0	0.00	0	1.5	1.4
14TULA	4,216	0.20	0	0.20	0	2.3	1.6
15TULA	2,865	0.80	0	1.20	1.7	1.6	4.4
16TULA	3,260	12.30	0	0.00	0	1.8	2.2
17TULA	3,661	0.13	0	0.00	0	3.2	2.9
18TULA	423	0.50	0	0.60	0	2.0	1.1
19TULA	1,495	0.09	0	0.00	0	1.5	1.3
20TULA	496	0.40	0	3.30	0	3.4	3.2
21TULA	735	0.12	0	0.00	3.9	2.0	1.2
22TULA	532	0.80	0	1.00	0	2.0	1.5
23TULA	1,893	5.37	0	0.00	0	0.7	3.3
24TULA	2,018	9.55	0	0.00	0	0.8	1.6
25TULA	1,126	0.80	0	1.40	0	7.4	3.8
26TULA	1,228	9.08	0	0.00	0	0.8	1.9
27TULA	1,369	5.89	0	0.00	0	0.6	2.7
28TULA	2,807	2.37	0	0.00	0	1.0	1.5
29TULA	3,626	0.50	0	7.00	0	2.0	1.3
30TULA	3,732	0.10	0	0.70	0	1.8	2.6
31TULA	1,870	7.96	0	0.00	0	2.1	1.1
32TULA	3,703	0.48	0	6.40	0	1.5	1.3
33TULA	1,200	0.40	0	0.10	1.7	1.5	1.3
34TULA	1,250	0.24	0	2.25	0	4.5	1.5
35TULA	5,100	5.00	0	0.00	0	1.0	5.1

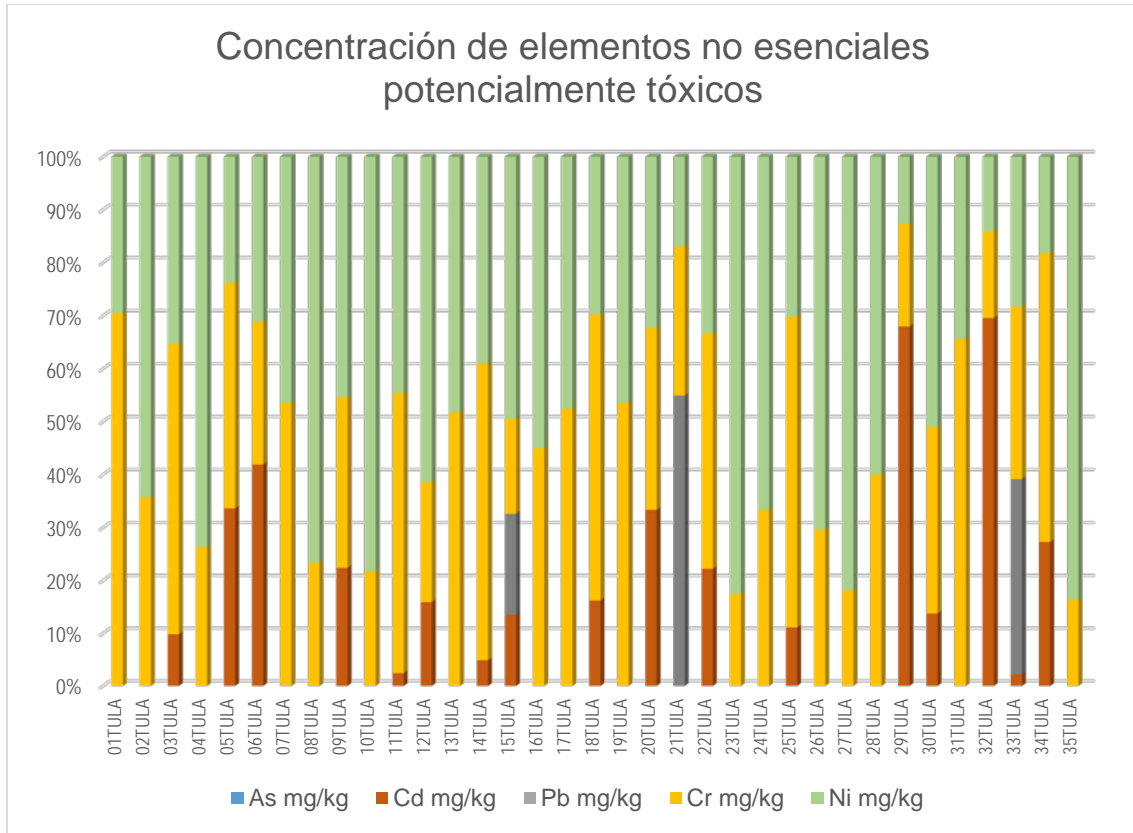
Muestra	N-NO3 mg/kg	Sodio (Na) %	Arsénico (As) mg/kg	Cadmio (Cd) mg/kg	Plomo (Pb) mg/kg	Cromo (Cr) mg/kg	Níquel (Ni) mg/kg
Rango de las concentraciones	2000--3500	4--8		2--5	1.25--2.75	2.5--5	2.5--4
Bajo	51.4%	74.3%	0.0%	82.9%	91.4%	77.1%	57.1%
Medio	22.9%	14.3%	0.0%	11.4%	5.7%	20.0%	28.6%
Alto	25.7%	11.4%	0.0%	5.7%	2.9%	2.9%	14.3%

Fuente: *Elaboración propia*

El sodio altera negativamente la estructura del suelo, porque dispersa las partículas edáficas y contribuye de manera significativa a la compactación del espacio poroso, con la consiguiente afectación de la tasa de flujo de aire y circulación del agua. Además la toxicidad de los cultivos se manifiesta en la disminución del crecimiento de la raíz y como necrosis foliar, reduciendo el área fotosintética. Esta situación es frecuente en suelos alcalinos con drenaje impedido y también por riegos con altas concentraciones de sodio. De acuerdo a los resultados obtenidos, en algunos casos se observó un exceso de acumulación de sodio en el tejido vegetal, y aunque no se manifestaron problemas fitotóxicos, es una situación a la que se le debe prestar mayor atención porque en caso de ser recurrente la aplicación de cantidades excesivas de sodio, este elemento se acumulará en el suelo y eventualmente causará problemas edáficos y productivos.

De acuerdo a la Gráfica 4 de columna apilada se puede apreciar que el arsénico, cadmio, plomo, cromo y níquel presentaron mayor concentración por muestra; se hace notar que el arsénico no estuvo presente en ninguna de las muestras; el níquel es el elemento de mayor concentración seguido del cromo, ambos elementos son dominantes en los muestreos, en el caso del cadmio hubo dos casos con altas concentraciones rebasando el 60% de las muestras mientras para las demás muestras las concentraciones son menores; el plomo sólo estuvo presente en tres muestras, en dos de ellas junto con níquel-cromo-cadmio, este último en baja cantidad, mientras que en la otra muestra solo el níquel y cromo estuvieron presentes.

Los elementos potencialmente tóxicos son el níquel y cromo por lo que deberían ser monitoreados para prevenir efectos negativos en la producción de los cultivos.



Gráfica 4 Concentración de elementos no esenciales potencialmente tóxicos

Cuadro 53 Elementos potencialmente tóxicos y su rango de concentraciones fito-tóxicas obtenidas para lo muestreado

	Elementos potencialmente tóxicos						
	N-NO3 mg/kg	Na %	As	Cd	Pb	Cr	Ni
	Rango de valores obtenidos en mg/kg						
	2000-3500	4-8	0-0	2-5	1.25-2.75	2.5-5	2.5-4
<i>Distribución elaborada de acuerdo a los rangos obtenidos</i> Baja azul Media verde Alta rojo			Nulo				
	Bajo	Bajo		Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

Fuente: Elaboración propia

IX. Conclusiones

Características químicas del agua de riego y sus indicadores

El balance catiónico-aniónico del 97% se considera satisfactorio, y aunque la diferencia entre cationes y aniones promedio del 7.74% indica la presencia de otros elementos, por tratarse de agua residual el resultado es acertado. La relación de la sumatoria de cationes y la conductividad eléctrica con 93 de pendiente, presentó un balance satisfactorio.

El rango de pH de las aguas residuales, de 6.7 a 8.4, es el normal (6.5 a 8.4).

El agua presentó una relación CE y SDT con una pendiente 0.75, por lo que se considera de bajo riesgo de salinización según la FAO, 1994. Solo una muestra se encontró como de grado severo, el resto de las muestras presentan grado leve a moderado.

Índices de segundo grado: La relación de adsorción de sodio (RAS) indicó que las aguas tienen un bajo contenido de sodio, por lo que su aplicación no causará problemas de sodificación edáfica. El carbonato de sodio residual (CSR) indica que en general el agua es Buena, con un 22% de muestras con clase condicionada.

El agua es dura y de alta alcalinidad, y tiene tendencia a formar incrustaciones y/o corrosión, de acuerdo a los siguientes índices:

- Índice Langelier: 72% forma incrustaciones, 28% no causara problemas
- Índice Ryznar: 81.25% agua corrosiva, 19.75% agua susceptible a incrustar
- Índice Saturación: 78% agua incrustante, 6.5% agua corrosiva, el resto en equilibrio químico
- Índice Puckorius: 12.5% tendencia a incrustarse, 87.5% optimo
- Índice Larson: 59.4% corrosión significativa, 31.2% corrosión elevada, 9.4% no corrosiva. Este índice se puede descartar ya que el agua analizada no corresponde a baja alcalinidad y los resultados pueden ser erróneos.

Calidad del agua de riego

El agua presenta problema en aumento conforme a Ayers y Wescott (1987).

El 72% del agua muestreada puede utilizarse en casi todos los cultivos y suelo, y generalmente no debe usarse para riego, de acuerdo a la clasificación por Richards (1954). Este criterio se considera más acertado, ya que la calidad del agua aun no presenta problemas tóxicos a los cultivos y/o suelo.

Contaminantes en el agua de riego

Contaminantes básicos, Metales pesados y cianuros

El pH (6.7 y 8.4) encontrado en las aguas se considera normal. El DBO5 está por encima de los límites máximos permisibles (LMP) en el 75% de lo muestreado, los Coliformes fecales rebasan los LMP en el 84.4% de lo muestreado, las grasas y aceites están en concentraciones normales.

El cadmio y cromo rebasaron los LMP, en el 65.6% y 50% de lo muestreado, respectivamente. El níquel y mercurio fueron detectados en menor concentración en el agua, pero rebasaron los LMP en el 40% de las muestras.

Características físicas y químicas del suelo

Las clases de suelo obtenidas con base en el triángulo textural del suelo fueron 5, pero de acuerdo a la distribución geográfica las clases de suelo Franco (31.4%), Franco-arcillosa (28.6%) y Arcilla (25.7%) son las más representativas y frecuentes en la zona de estudio.

Las constantes hídricas presentan un patrón similar de distribución con respecto a la clase textural.

El 46% de lo muestreado tiene densidad aparente ideal, aunque el resto presentan textura de arcilla y franco-arcillosa, tampoco tienen efecto negativo en el crecimiento radicular.

El suelo presenta efectos despreciables a la salinidad (CE menor a 1ds/m), por lo que no se prevén problemas, de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

La mayoría del suelo de la zona de estudio es alcalino. La interpretación de los valores de pH indicó la siguiente distribución: 51% medianamente alcalino, 43% fuertemente

alcalino y 6% neutro. Las sales el sodio son las de mayor concentración y los demás elementos están en contenidos intermedios.

En general se puede decir que los contenidos de materia orgánica son altos con las siguientes distribución de clase: alta, muy alta y media para el 51%, 34% y 14% de las muestras analizadas, respectivamente.

Presencia de sales: Las aguas residuales son alcalinas y en el análisis de sales para cada muestra se corroboró dicha cualidad por los contenidos altos de cloruro y sodio con valores de concentración máxima de 26 meq/L.

El orden de concentración de las sales encontradas es: Cloruro > Sodio > Carbonato > Calcio > Sulfato y Bicarbonato > Potasio > Magnesio > Boro > Fosforo

Contenido nutrimental del suelo

La cantidad de nitrógeno aportada a través del agua residual mediante el riego es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos que se producen en la zona hasta un cierto tope de rendimiento. Los contenidos de **fósforo Olsen** encontrados son mayores a 11 mg/kg, por lo que se clasifican en la clase "Alto". La interpretación de las concentraciones de ambos nutrimentos se hicieron con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Elementos no esenciales potencialmente tóxicos en el suelo

Según la tolerancia de los cultivos para cadmio, plomo y níquel los suelos presentan concentraciones normales (NOM-021-SEMARNAT-2000).

En cuanto a cromo ninguna muestra llega a rebasar la concentración de referencia (NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004), y cabe señalar que el arsénico no fue detectado en ninguna muestra analizada.

El cadmio y cromo presentan tendencia baja de las concentraciones, salvo el plomo y el níquel que cuentan con tendencia media.

Nutrientes del Tejido vegetal

En los *Macro-nutrientes* se detectó acumulación nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, y magnesio en el tejido vegetal por el exceso de dichos nutrientes en el suelo, pero ninguno de estos elementos fue fito-tóxico; en cuanto a los niveles de azufre los límites de su aprovechamiento fueron máximos sin causar acumulación ni fitotoxicidad.

La tendencia de las concentraciones con base en la clasificación propuesta en el presente estudio, para el fosforo, calcio y magnesio fue baja, y para los demás elementos fue media, con la observación que las concentraciones altas fueron de baja frecuencia entre el total de lo muestreado.

Los *Micro-nutrientes* tiene el siguiente orden con base en su concentración: hierro > manganeso > zinc > boro > cobre. Las concentraciones fueron superadas con respecto a la acumulación de los elementos analizados con en el tejido vegetal y ningún elemento causó daño fito-tóxico a la vegetación.

En otro análisis las tendencias fueron de clase baja para casi todos los nutrientes, salvo el boro que se presenta como clase media y de acuerdo a los análisis de presencia de sales en la solución del suelo este elemento se encuentra presente en el medio edáfico; también se observa como el hierro tiene mayor porcentaje de concentración “alta” con respecto a los demás elementos analizados; las clases media y baja son un tanto equitativas, por lo que puede ser un elemento de mayor presencia y se debe considerar un monitoreo.

Elementos no esenciales potencialmente tóxicos en el tejido vegetal

Los elementos no esenciales potencialmente tóxicos no causaron daños fito-tóxicos. De acuerdo a la relación entre la concentración de cada elemento y la biomasa se detectó una acumulación en el tejido vegetal para sodio, en cuanto al cadmio presentó una adsorción heterogénea, el cromo se mostró con tendencia ascendente, y el plomo solo se presentó en tres casos analizados.

X. Anexo cartográfico

Características del Agua

- A.1 Temperatura
- A.2 pH
- A.3 Conductividad Eléctrica
- A.4 Sólidos disueltos totales
- A.5 DBO5
- A.6 Coliformes fecales

Características del Suelo

- A.7 Textura
- A.8 pH
- A.9 Conductividad Eléctrica
- A.10 Densidad aparente
- A.11 Materia orgánica
- A.12 Constantes Hídricas
- A.13 Nutrientes en Tejido vegetal

Elementos no esenciales potencialmente tóxicos

- A.14 Arsénico
- A.15 Cadmio
- A.16 Cromo
- A.17 Níquel
- A.18 Plomo

Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

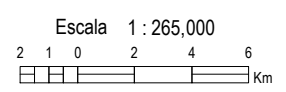
Ubicación



Simbología

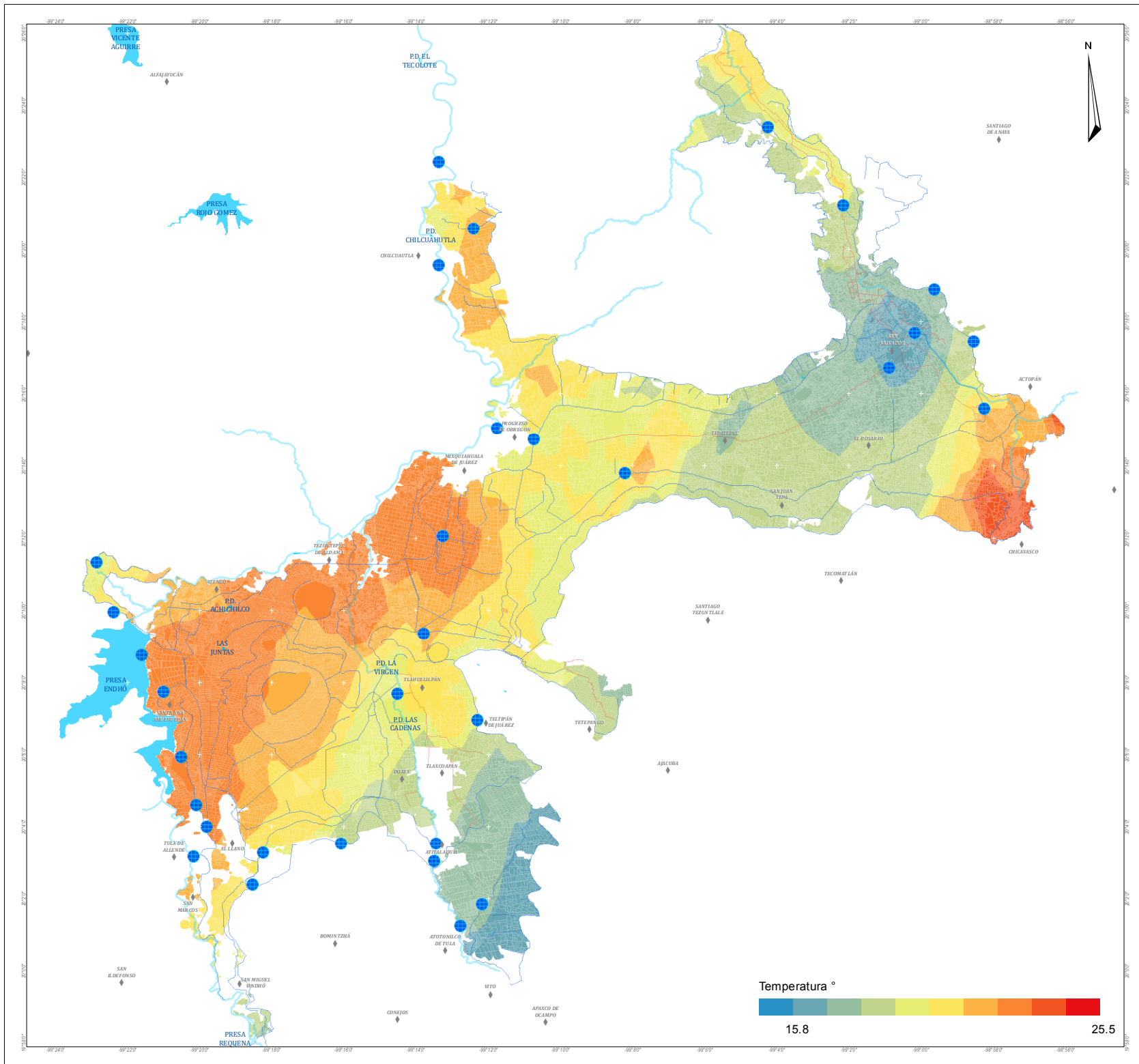
- ◆ Localidad
- Muestreo-Agua
- Red de conducción
- Red de drenaje
- Río
- Parcelamiento
- Cuerpo de agua

Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Degree



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DEL MUESTREO DE AGUA -- TEMPERATURA --

Elaboró Alejandra Flores Avalos
 Para Tesis de Maestría en Ciencias



Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

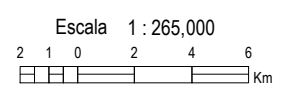
Ubicación



Simbología

- ◆ Localidad
- Muestreo-Agua
- Red de conducción
- Red de drenaje
- Río
- Parcelamiento
- Cuerpo de agua

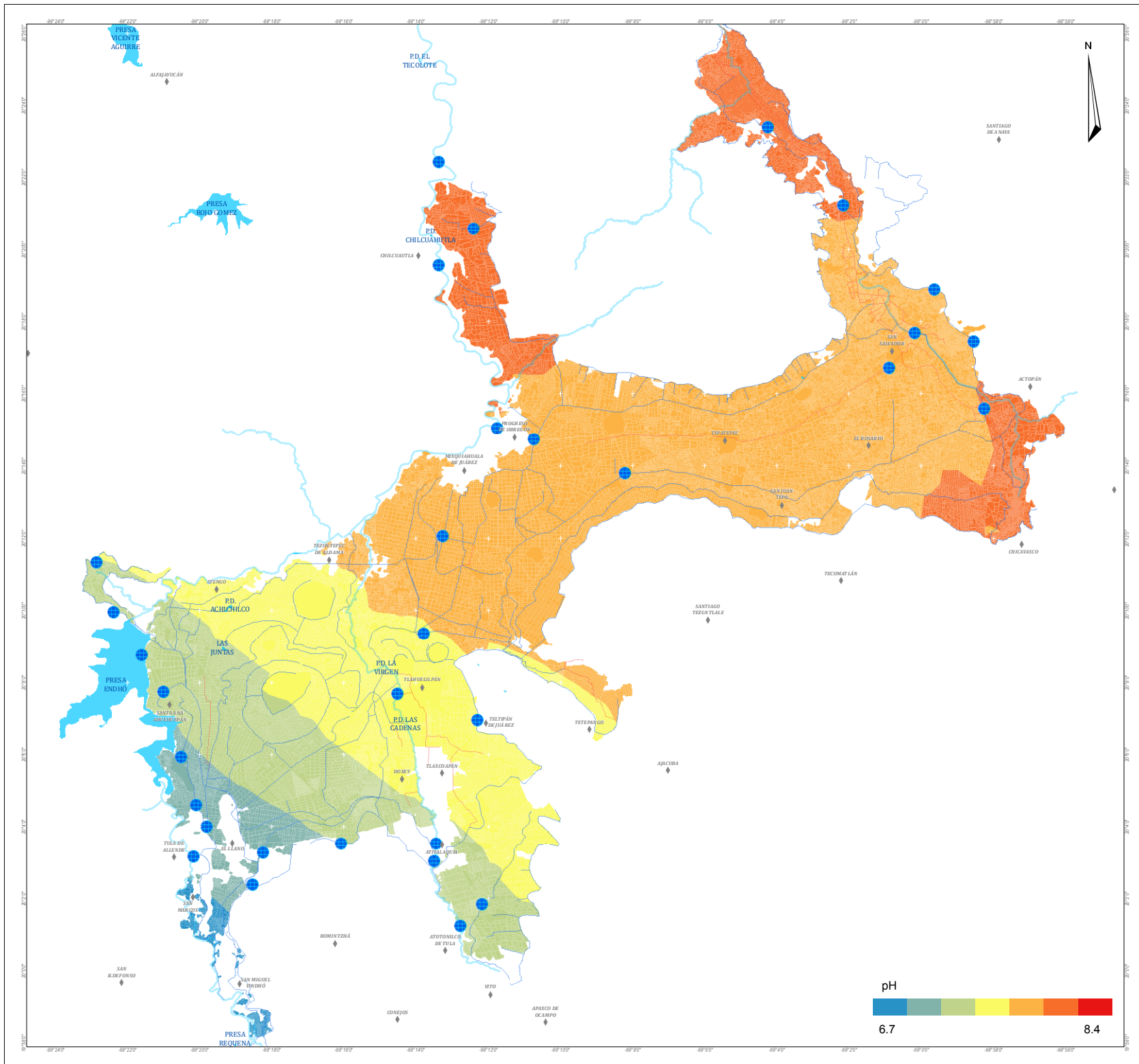
Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Degree



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DEL MUESTREO DE AGUA

-- pH --

Elaboró Alejandra Flores Avalos
 Para Tesis de Maestría en Ciencias



Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

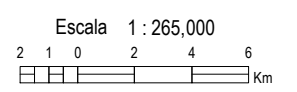
Ubicación



Simbología

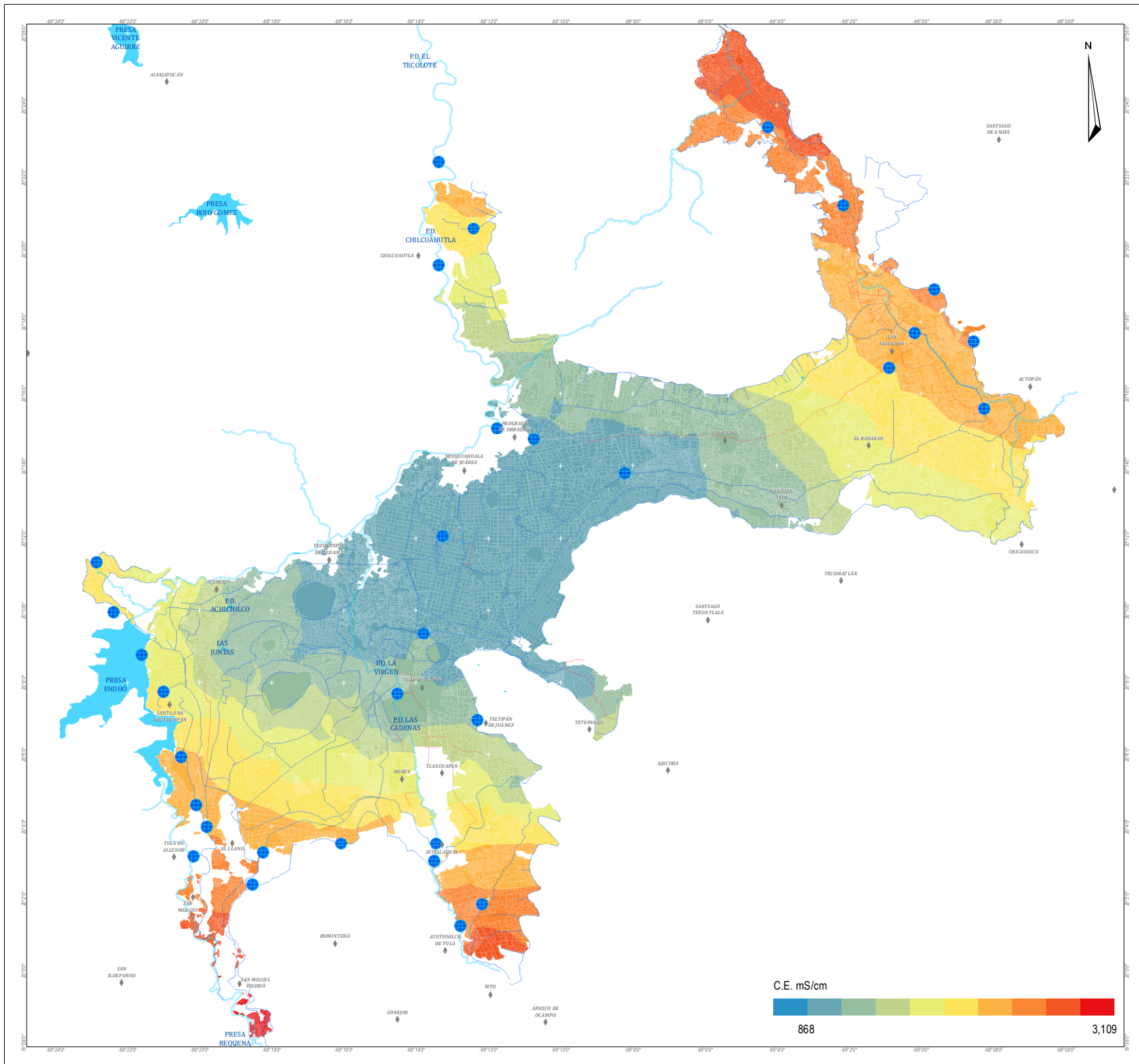
- ◆ Localidad
- Muestreo-Agua
- Red de conducción
- Red de drenaje
- Río
- Parcelamiento
- Cuerpo de agua

Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Degree



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DEL MUESTREO DE AGUA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Elaboró Alejandra Flores Avalos
 Para Tesis de Maestría en Ciencias



Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

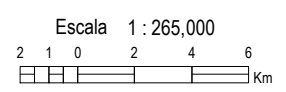
Ubicación



Simbología

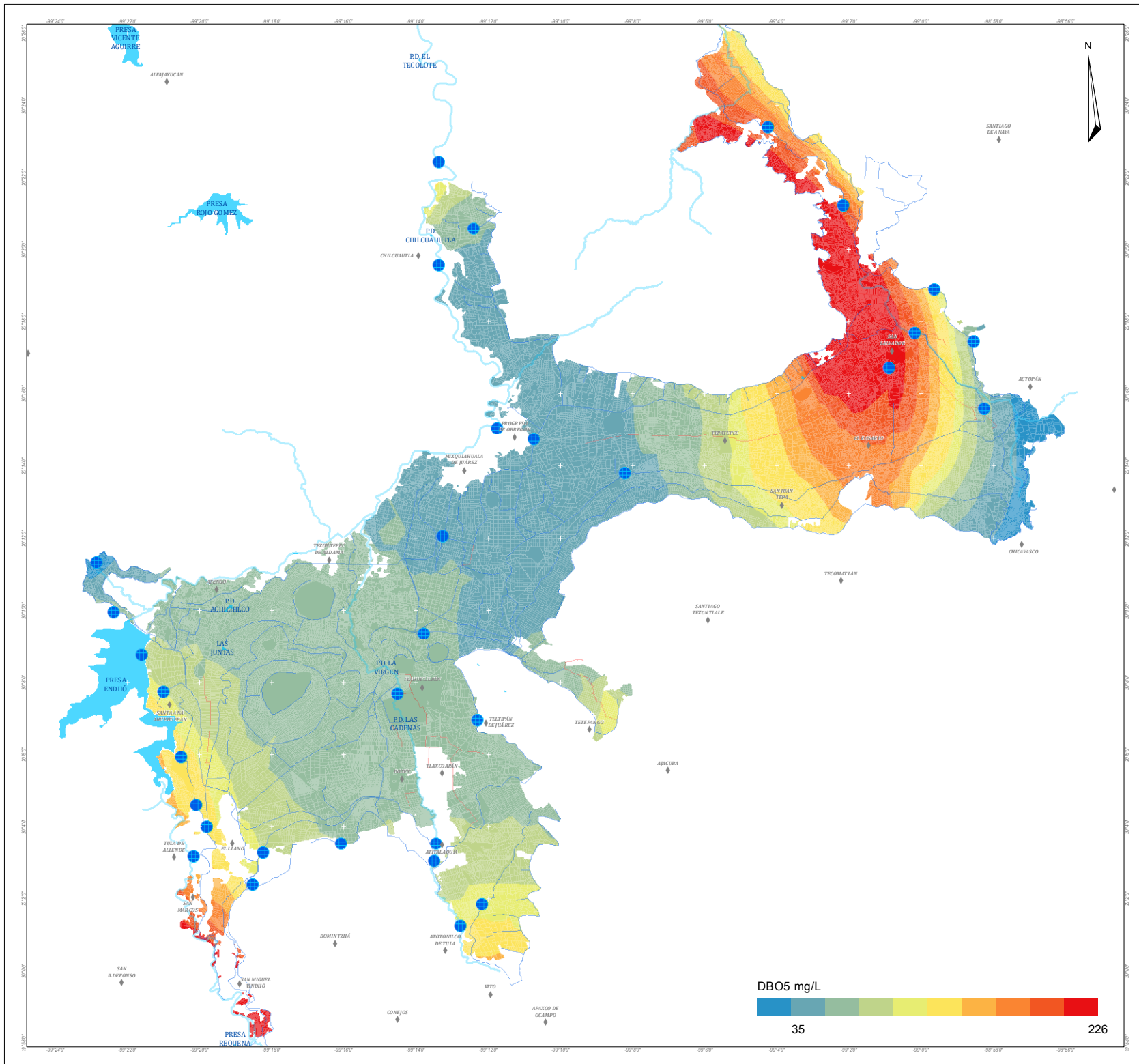
- ◆ Localidad
- Muestreo-Agua
- Red de conducción
- Red de drenaje
- Río
- Parcelamiento
- Cuerpo de agua

Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Degree



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DEL MUESTREO DE AGUA -- DBO5 --

Elaboró Alejandra Flores Avalos
 Para Tesis de Maestría en Ciencias



Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

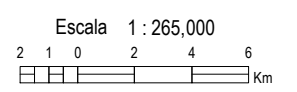
Ubicación



Simbología

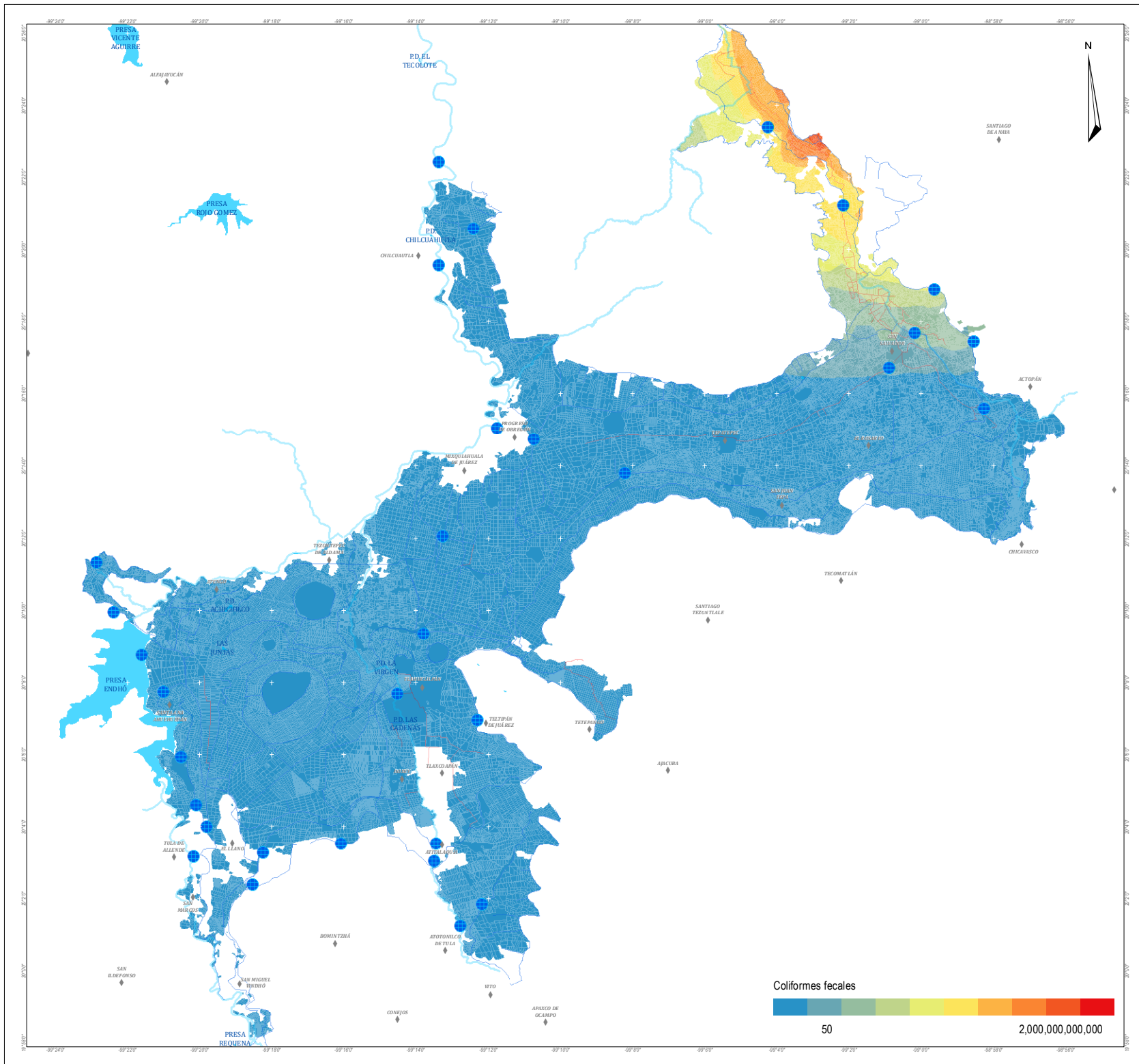
- ◆ Localidad
- Muestreo-Agua
- Red de conducción
- Red de drenaje
- Río
- Parcelamiento
- Cuerpo de agua

Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Degree



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DEL MUESTREO DE AGUA -- COLIFORMES FECALES --

Elaboró Alejandra Flores Avalos
 Para Tesis de Maestría en Ciencias



Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

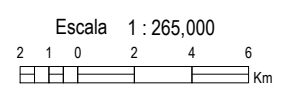
Ubicación



Simbología

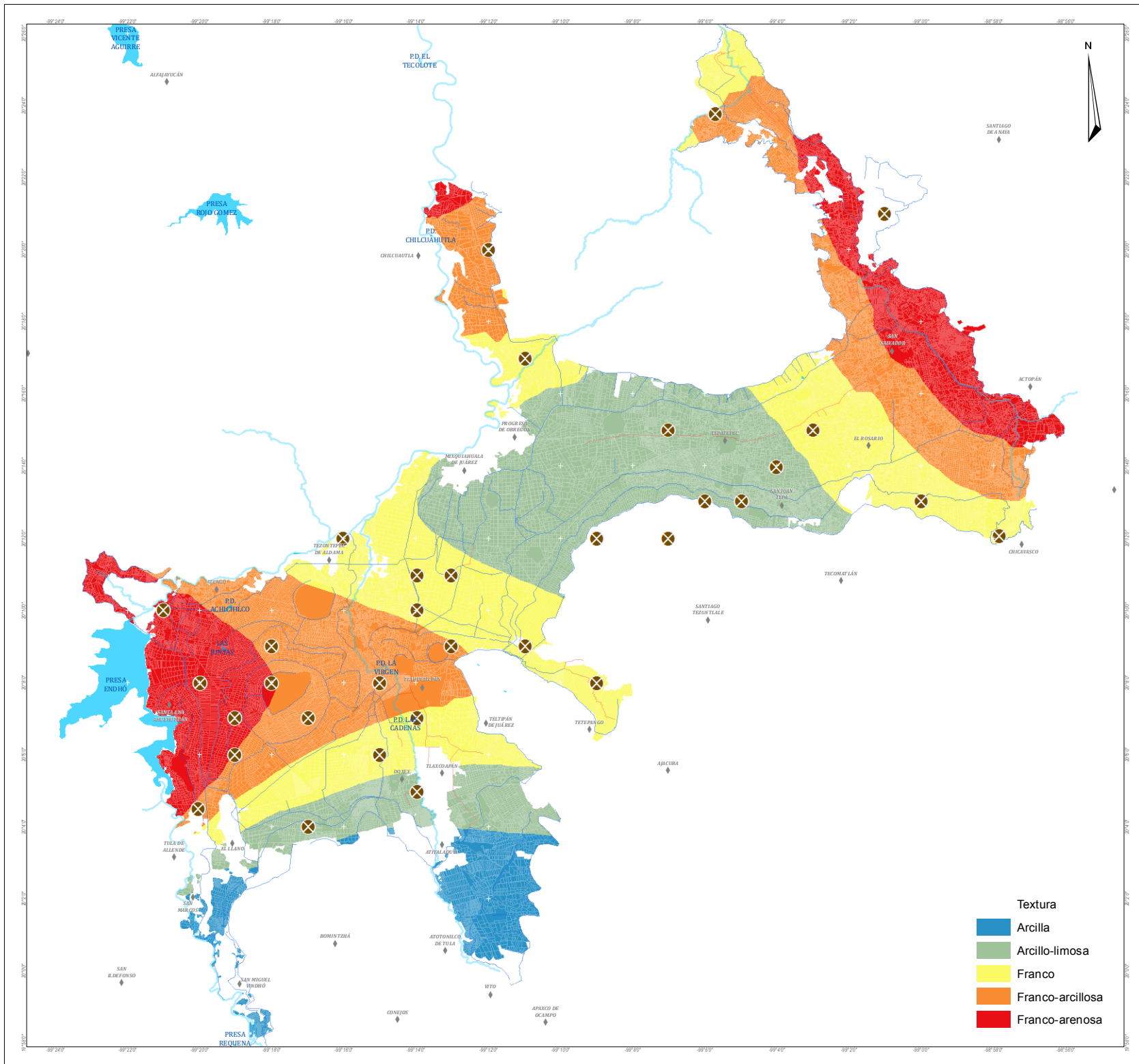
- ◆ Localidad
- ⊗ Muestreo-Suelo
- Red de conducción
- Red de drenaje
- Río
- Parcelamiento
- Cuerpo de agua

Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Degree



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DEL MUESTREO DE SUELO -- TEXTURA --

Elaboró Alejandra Flores Avalos
 Para Tesis de Maestría en Ciencias



- Textura
- Arcilla
 - Arcillo-limosa
 - Franco
 - Franco-arcillosa
 - Franco-arenosa

Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

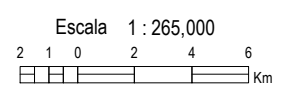
Ubicación



Simbología

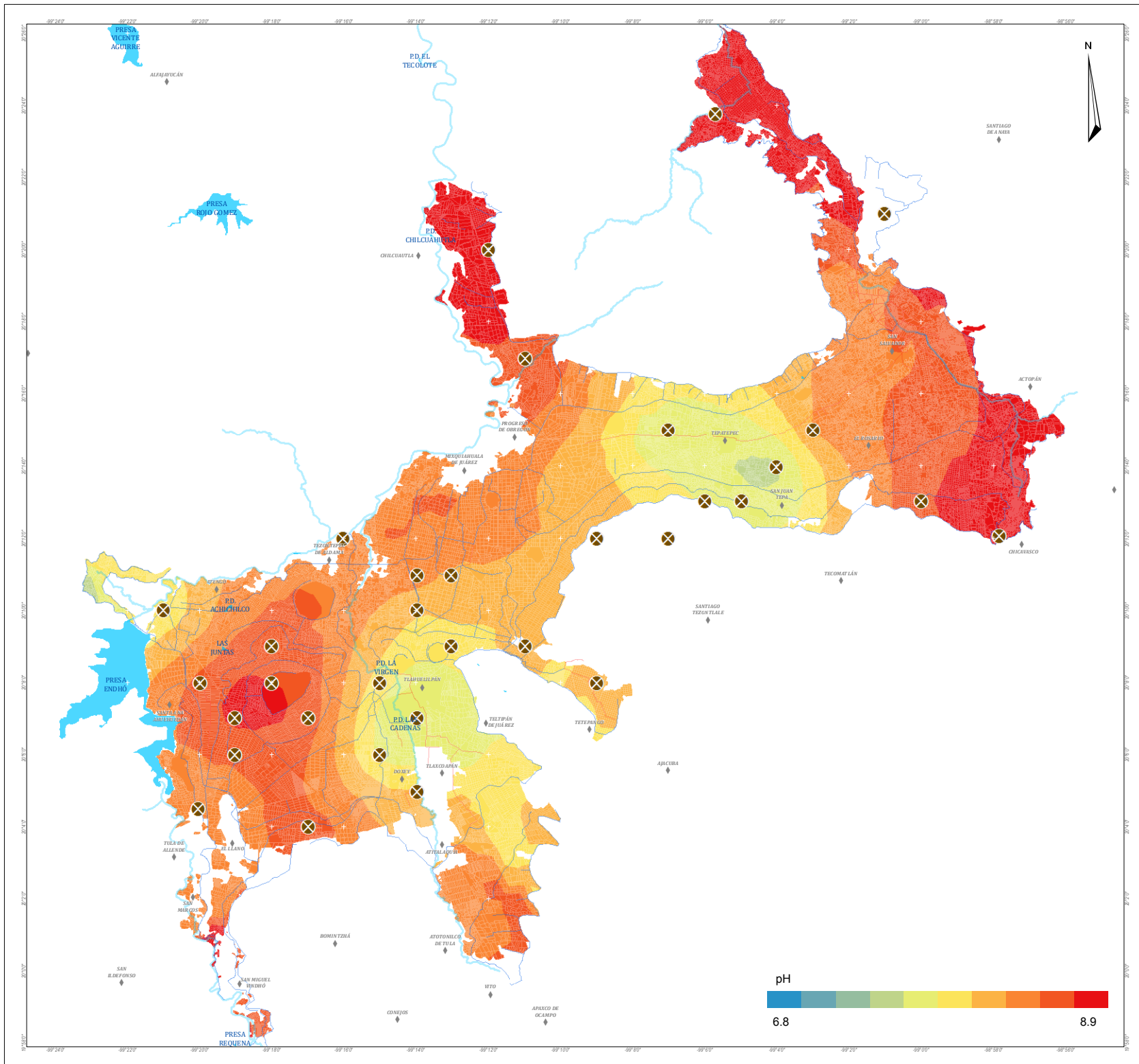
- ◆ Localidad
- ⊗ Muestreo-Suelo
- Red de conducción
- Red de drenaje
- Río
- Parcelamiento
- Cuerpo de agua

Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Degree



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DEL MUESTREO DE SUELO -- pH --

Elaboró Alejandra Flores Avalos
 Para Tesis de Maestría en Ciencias



Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

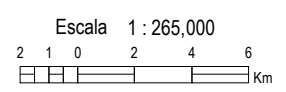
Ubicación



Simbología

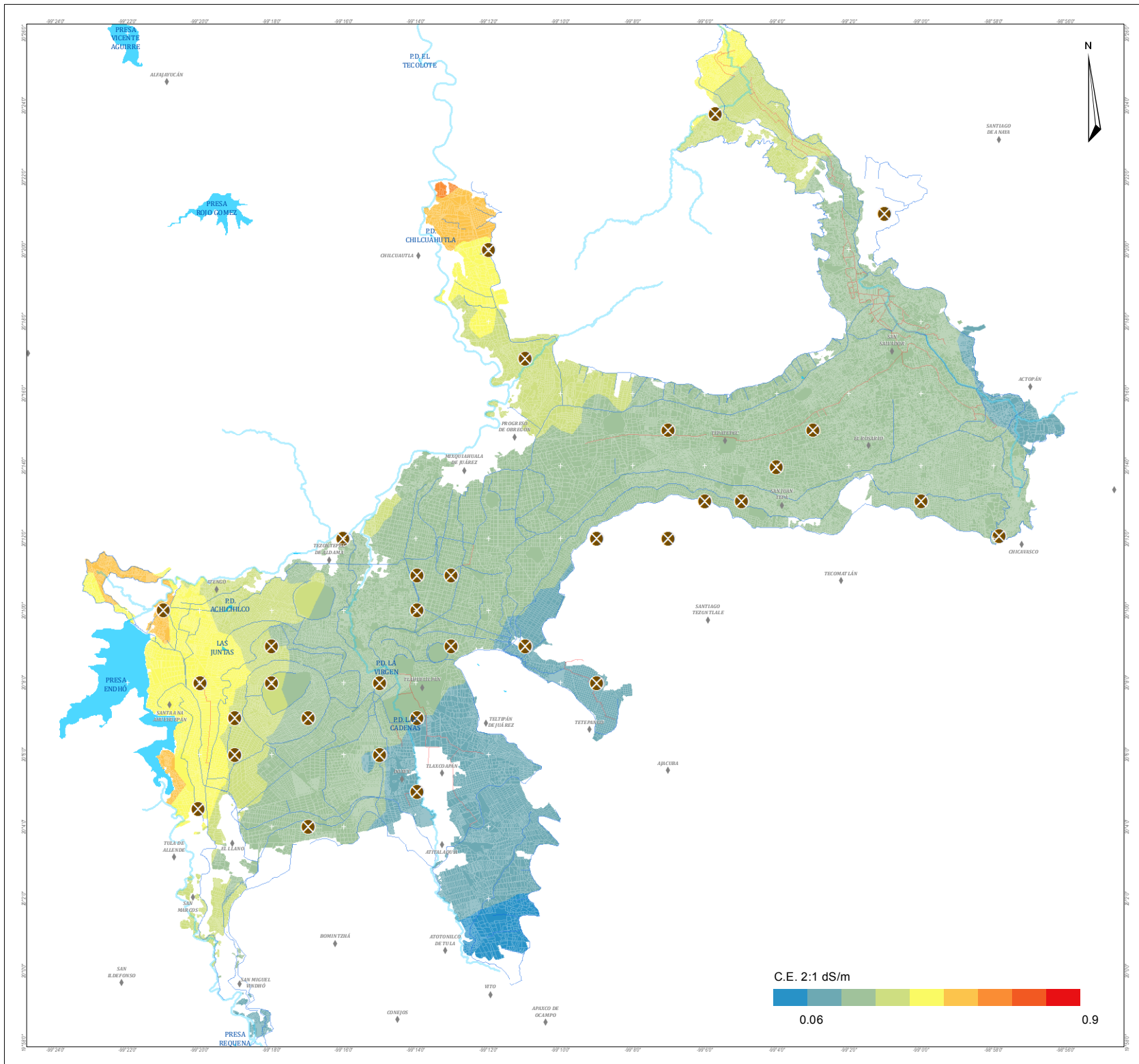
- ◆ Localidad
- ⊗ Muestreo-Suelo
- Red de conducción
- Red de drenaje
- Río
- Parcelamiento
- Cuerpo de agua

Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Degree



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DEL MUESTREO DE SUELO -- CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA --

Elaboró Alejandra Flores Avalos
 Para Tesis de Maestría en Ciencias



Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

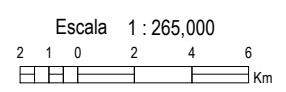
Ubicación



Simbología

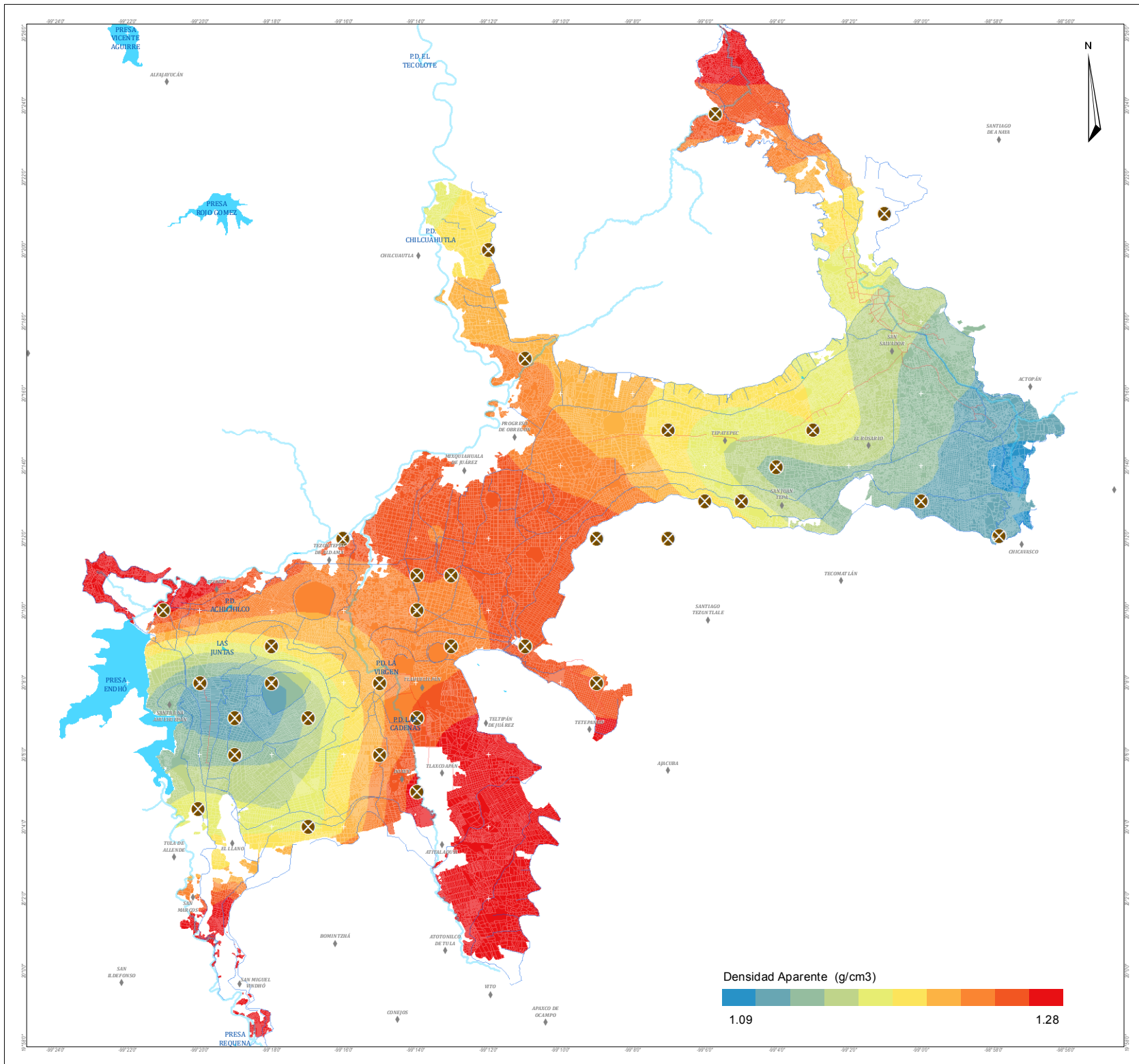
- ◆ Localidad
- ⊗ Muestreo-Suelo
- Red de conducción
- Red de drenaje
- Río
- Parcelamiento
- Cuerpo de agua

Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Degree



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DEL MUESTREO DE SUELO -- DENSIDAD APARENTE --

Elaboró Alejandra Flores Avalos
 Para Tesis de Maestría en Ciencias



Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

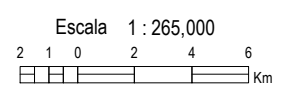
Ubicación



Simbología

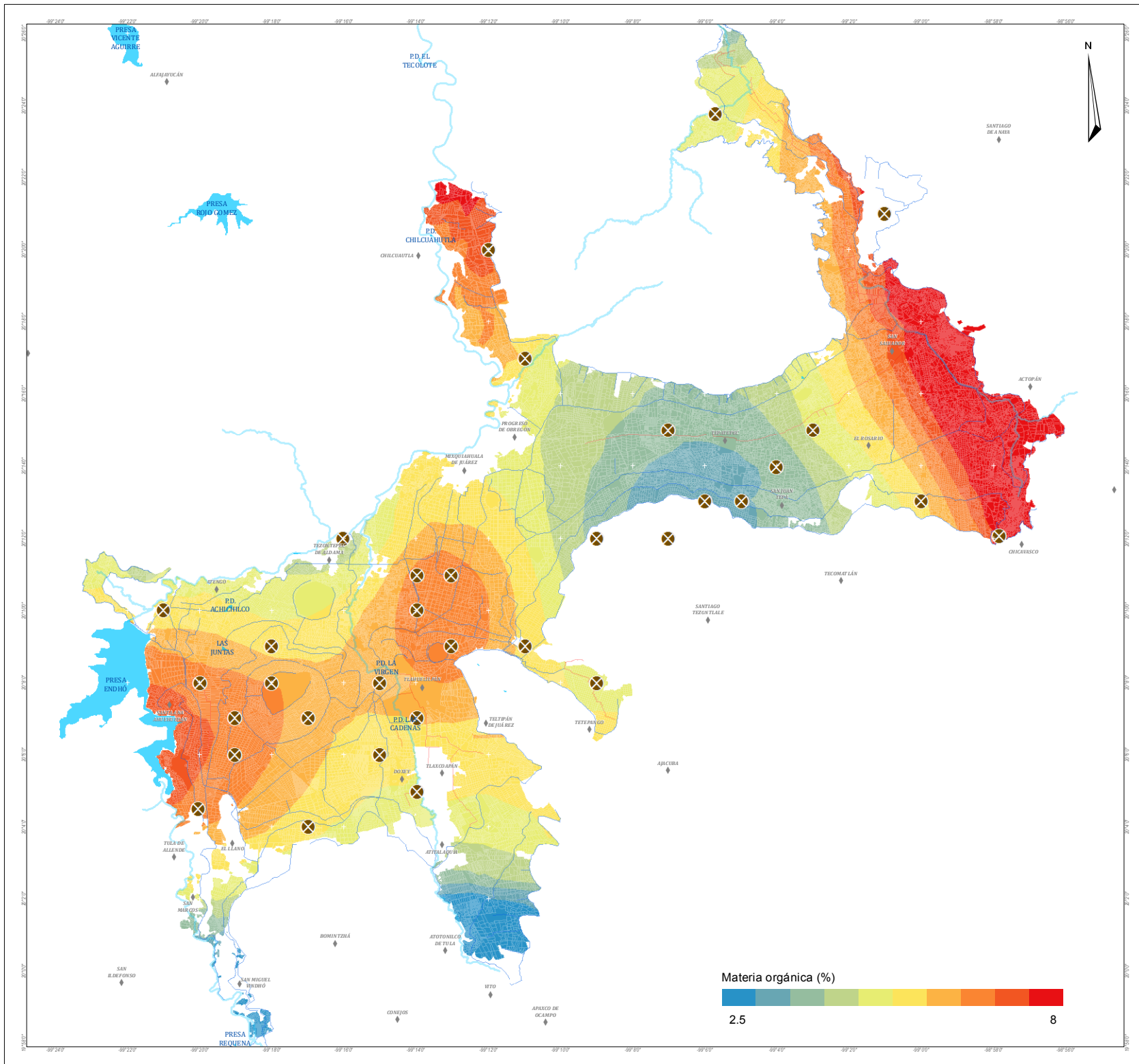
- ◆ Localidad
- ⊗ Muestreo-Suelo
- Red de conducción
- Red de drenaje
- Río
- Parcelamiento
- Cuerpo de agua

Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Degree



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DEL MUESTREO DE SUELO -- MATERIA ORGÁNICA --

Elaboró Alejandra Flores Avalos
 Para Tesis de Maestría en Ciencias



Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

Ubicación



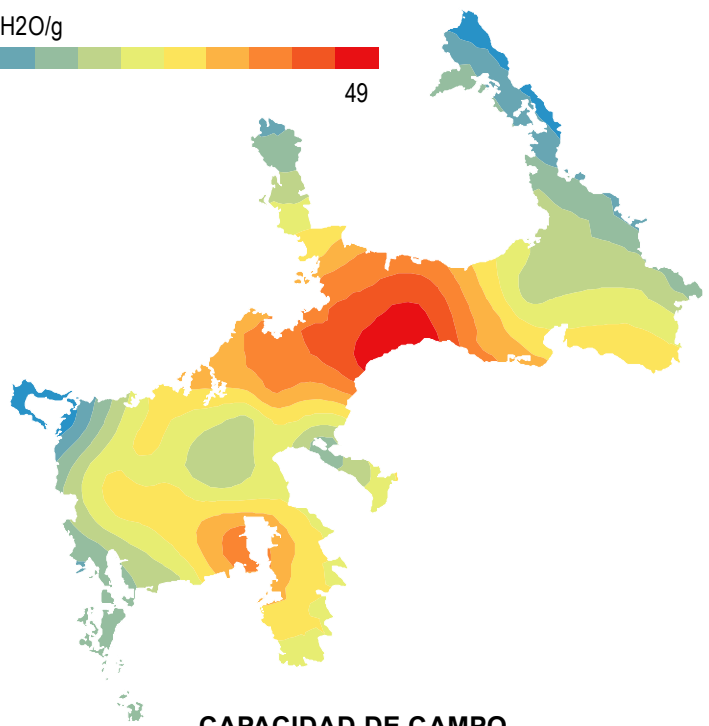
Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Unidades: Degree

Escala 1 : 550,000
2 1 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
Km

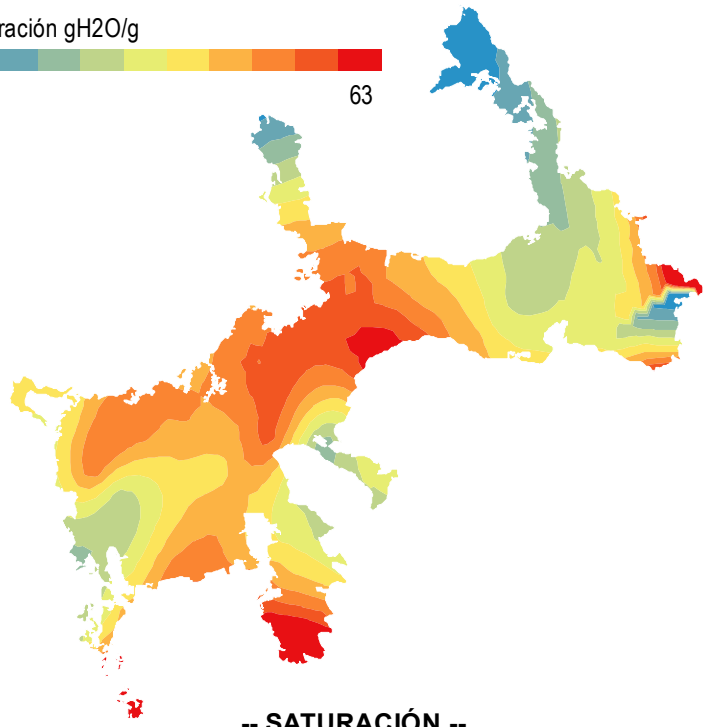
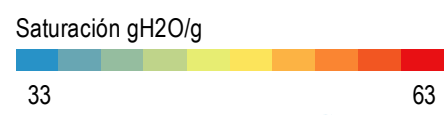
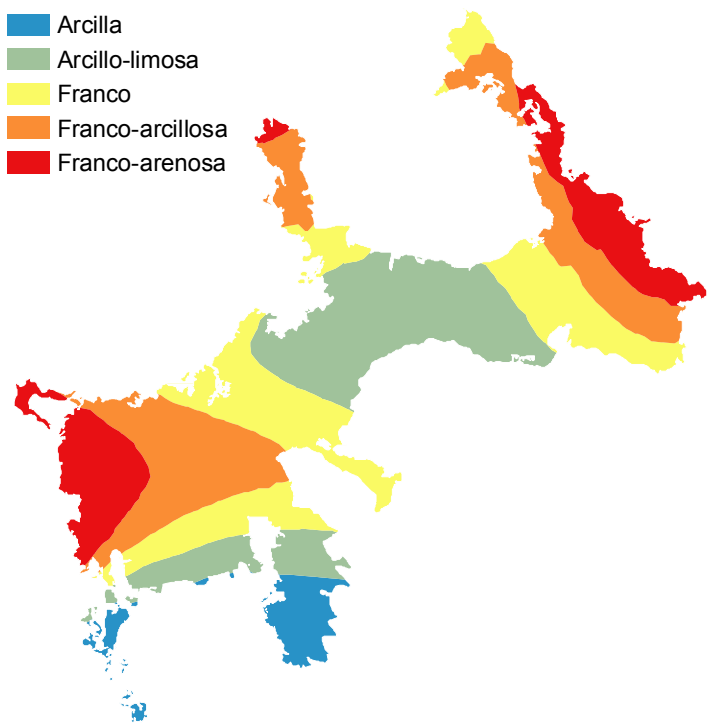
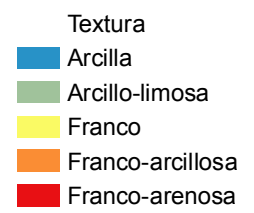


DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DE LOS MUESTREOS CONSTANTES HÍDRICAS

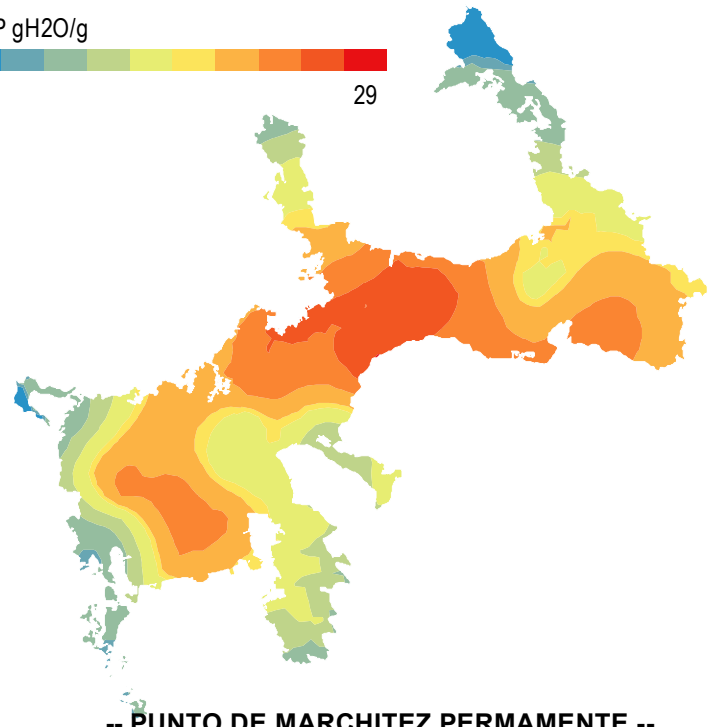
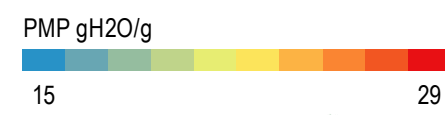
Elaboró Alejandra Flores Avalos
Para Tesis de Maestría en Ciencias



-- CAPACIDAD DE CAMPO --



-- SATURACIÓN --



-- PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE --

Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

Ubicación



Simbología

- ◆ Localidad
- ✱ Muestreo-Planta
- Red de conducción
- Red de drenaje
- Río
- Cuerpo de agua
- Parcelamiento

Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Degree

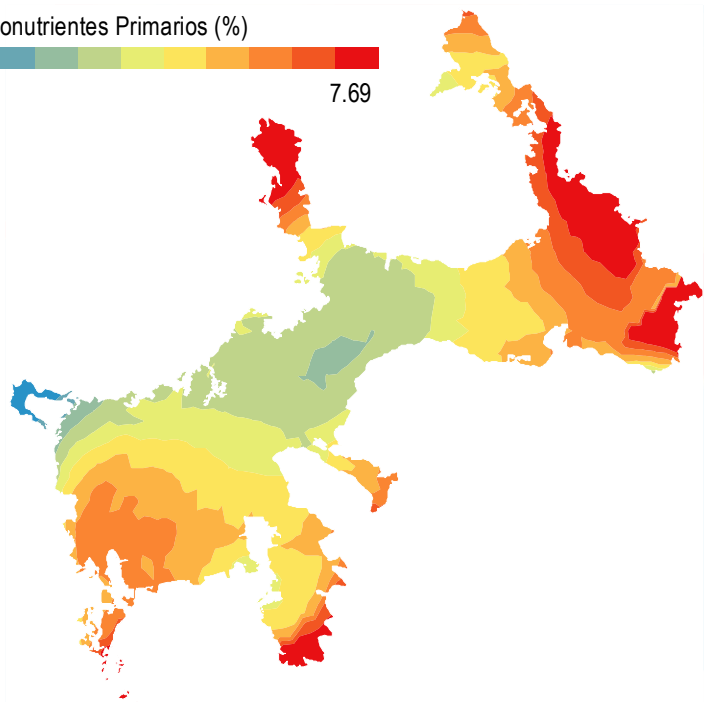
Escala 1 : 550,000
 2 10 2 4 6 8 10 12 14 16 18
 Km



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DE LOS MUESTREOS NUTRIENTES EN TEJIDO VEGETAL

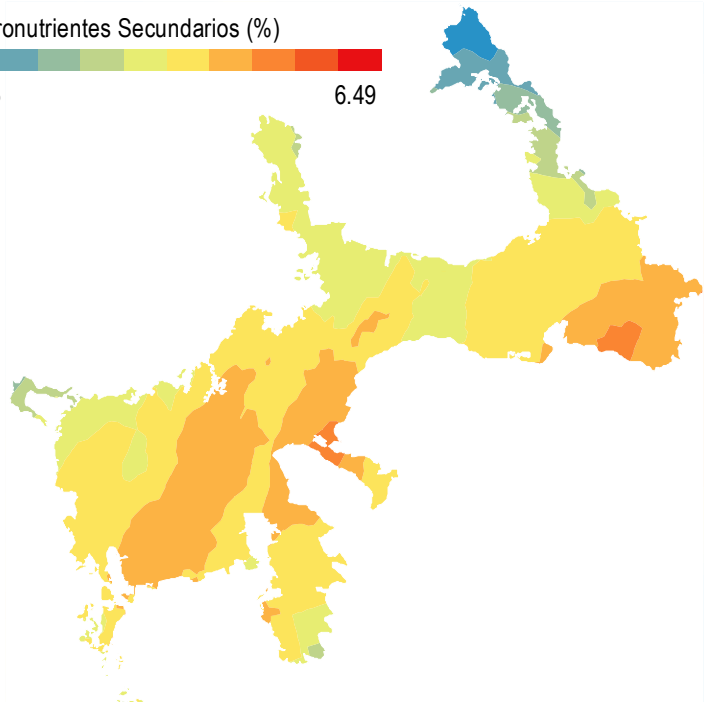
Elaboró Alejandra Flores Avalos
 Para Tesis de Maestría en Ciencias

Macronutrientes Primarios (%)
 3.65 7.69



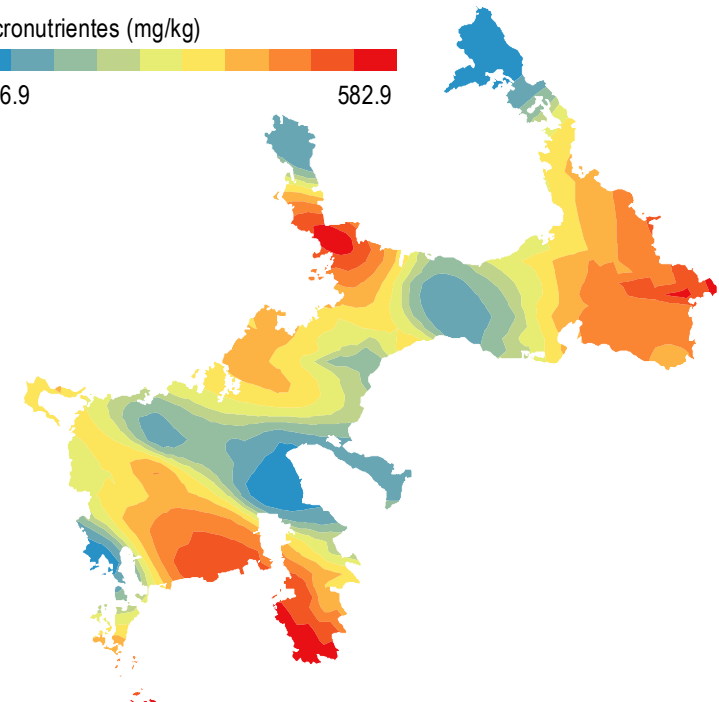
-- MACRONUTRIENTES PRIMARIOS --

Macronutrientes Secundarios (%)
 2.05 6.49

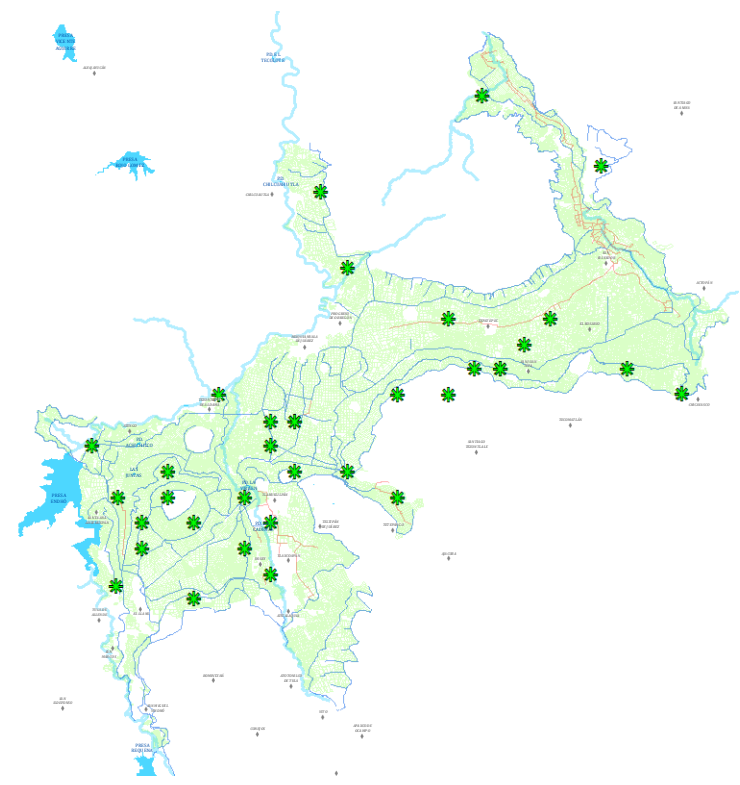


-- MACRONUTRIENTES SECUNDARIOS --

Micronutrientes (mg/kg)
 146.9 582.9



-- MICRONUTRIENTES --



Elementos no esenciales potencialmente tóxicos

Las concentraciones de los elementos no esenciales potencialmente tóxicos, siendo Arsénico, Cadmio, Cromo, Níquel y Plomo, se encuentra en los siguientes planos.

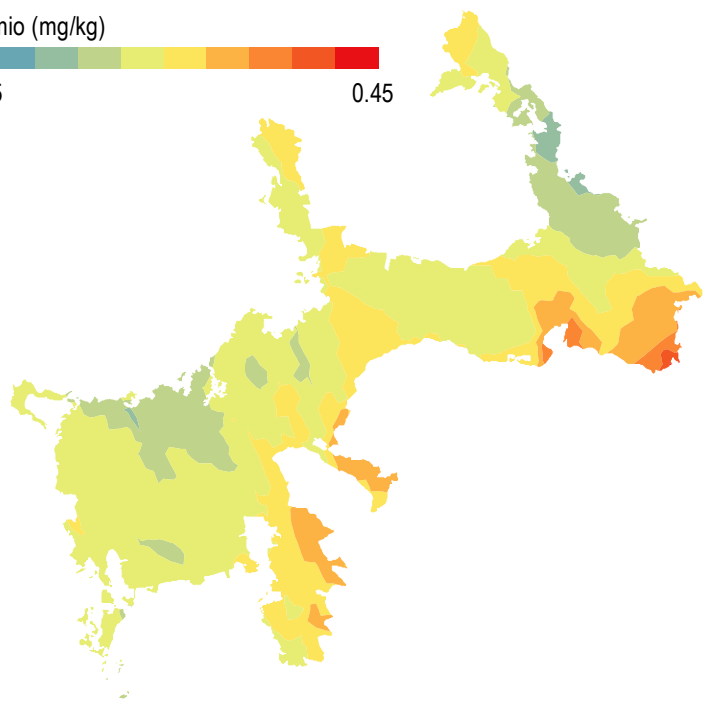
Donde se muestra la distribución geoespacial en el DR003-Tula y se puede observar la relación entre Agua, Suelo y Tejido vegetal de las concentraciones de los elementos considerados como tóxicos para este estudio.

Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

Ubicación

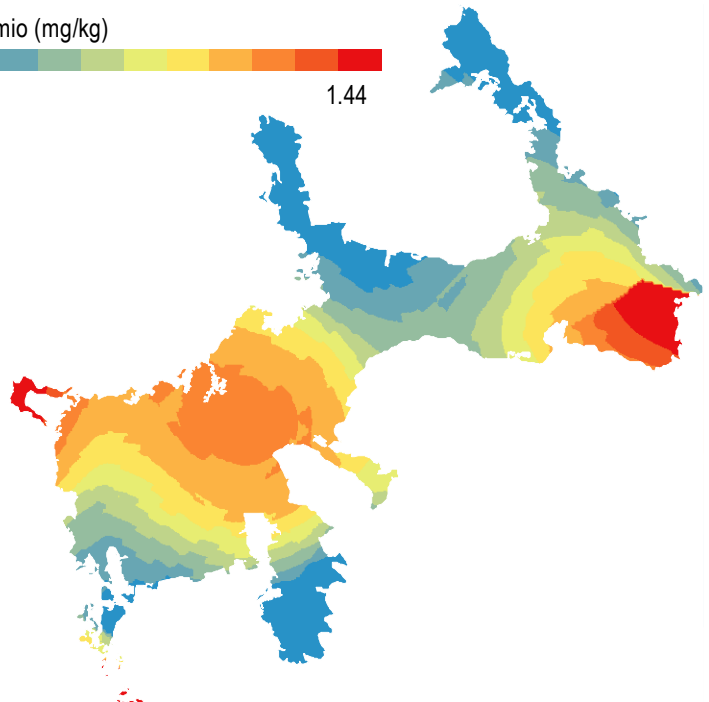


Cadmio (mg/kg)
0.125 0.45

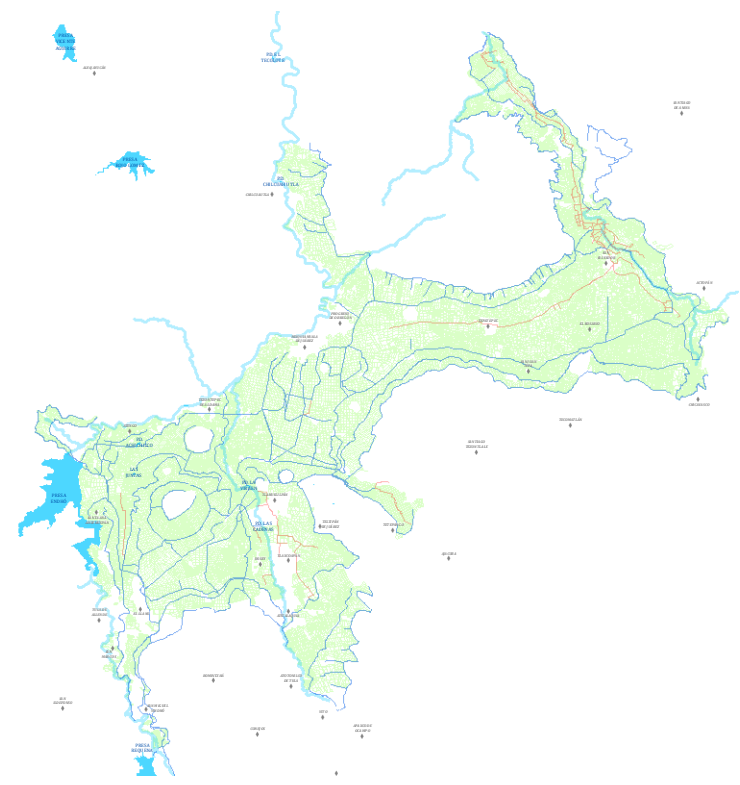


-- RESULTADOS DE AGUA --

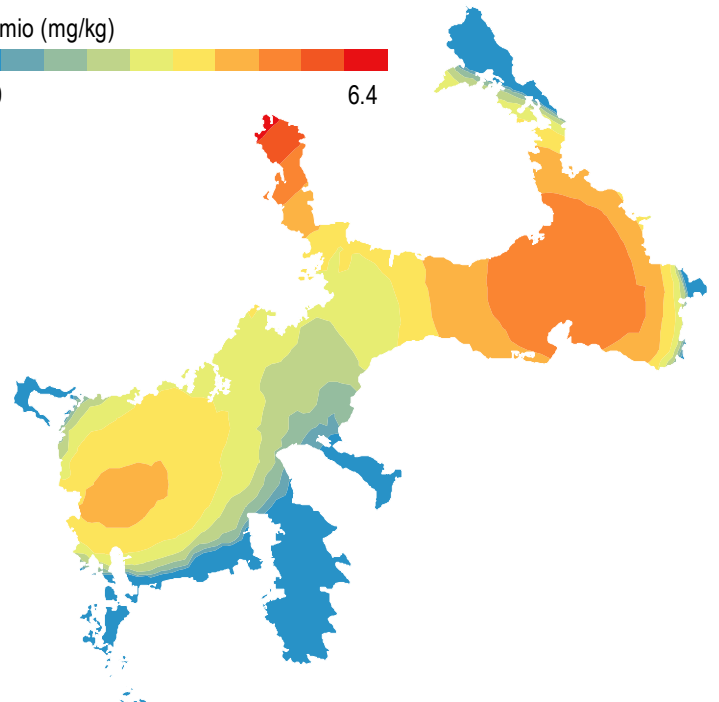
Cadmio (mg/kg)
0 1.44



-- RESULTADOS DE SUELO --



Cadmio (mg/kg)
0 6.4



-- RESULTADOS DE TEJIDO VEGETAL --

Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Unidades: Degree

Escala 1 : 550,000
2 10 2 4 6 8 10 12 14 16 18
Km



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DE LOS MUESTREOS CADMIO

Elaboró Alejandra Flores Avalos
Para Tesis de Maestría en Ciencias

Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

Ubicación



Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Unidades: Degree

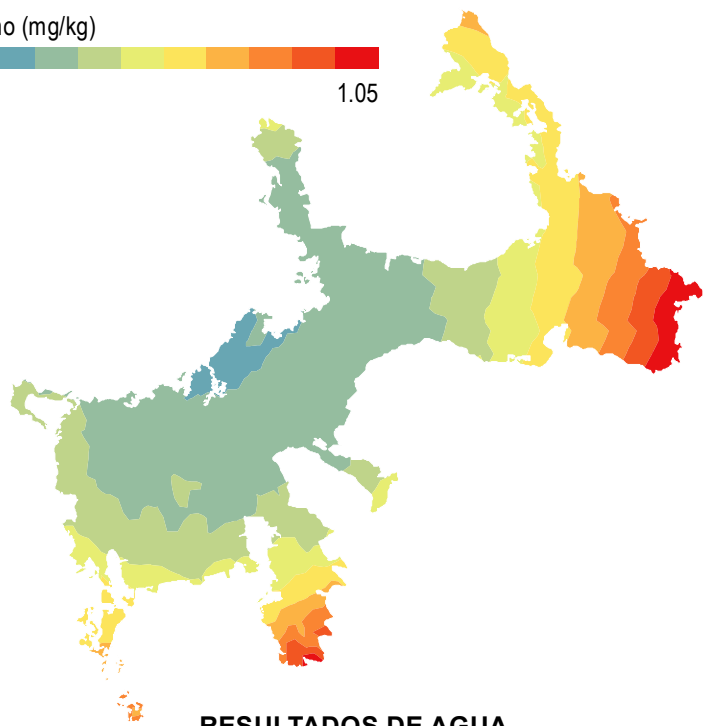
Escala 1 : 550,000
2 10 2 4 6 8 10 12 14 16 18
Km



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DE LOS MUESTREOS CROMO

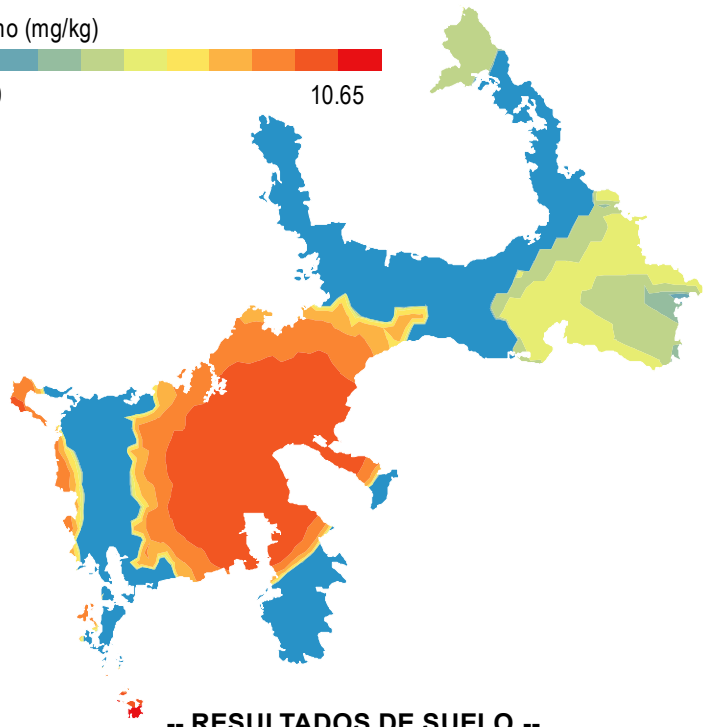
Elaboró Alejandra Flores Avalos
Para Tesis de Maestría en Ciencias

Cromo (mg/kg)
0.27 1.05

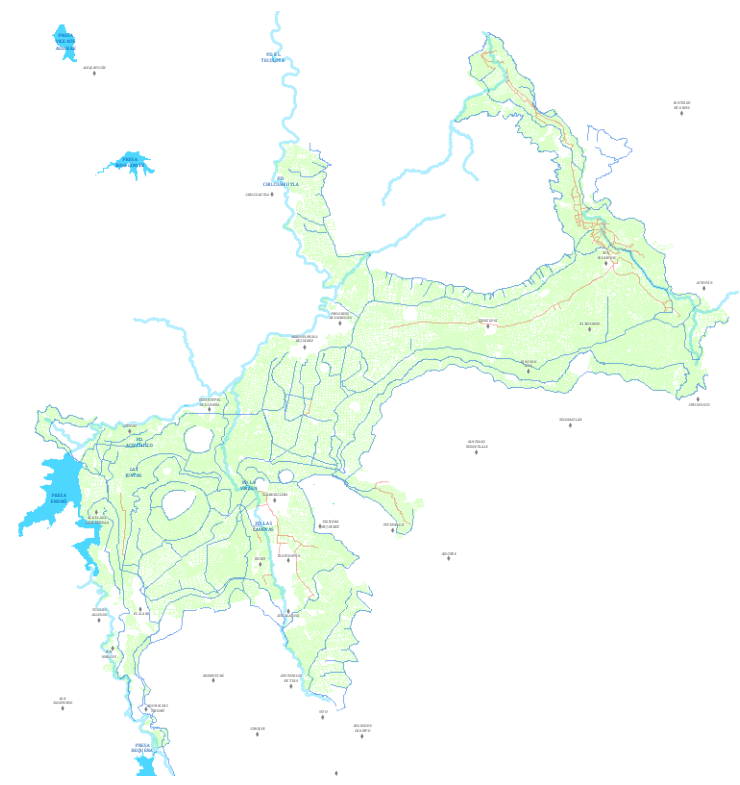


-- RESULTADOS DE AGUA --

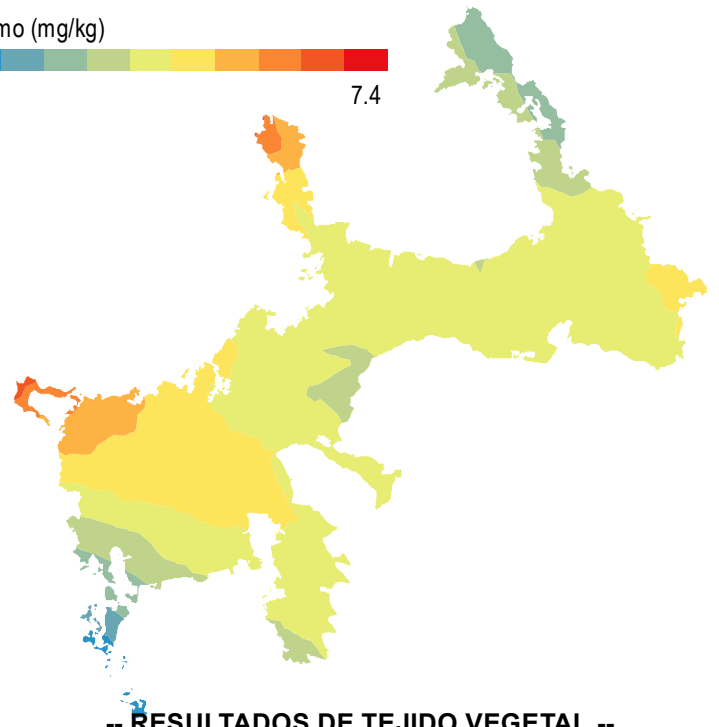
Cromo (mg/kg)
0 10.65



-- RESULTADOS DE SUELO --



Cromo (mg/kg)
0.5 7.4



-- RESULTADOS DE TEJIDO VEGETAL --

Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

Ubicación



Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Unidades: Degree

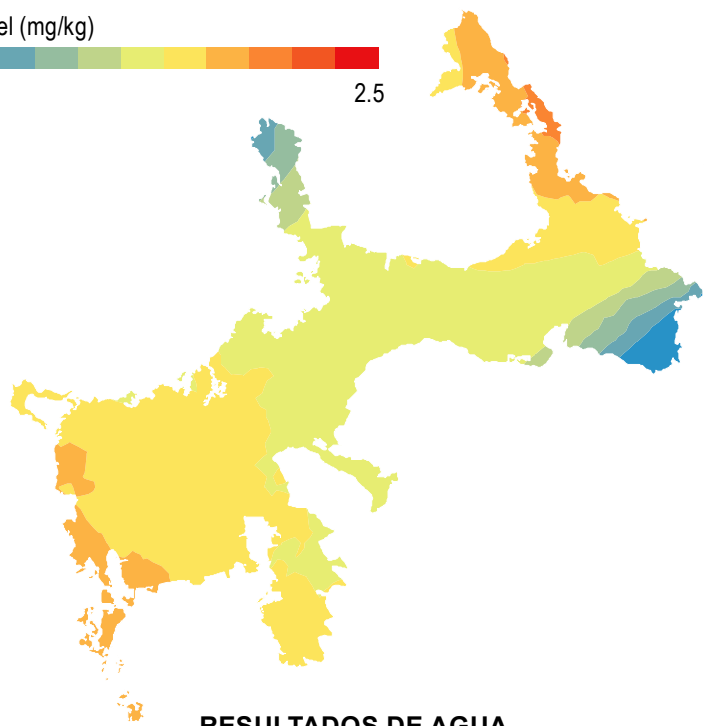
Escala 1 : 550,000
2 1 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
Km



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DE LOS MUESTREOS NÍQUEL

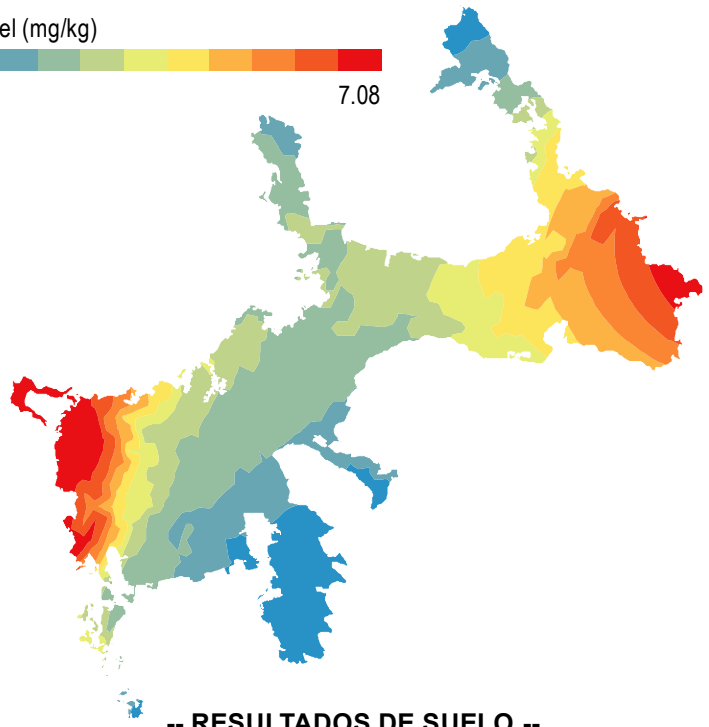
Elaboró Alejandra Flores Avalos
Para Tesis de Maestría en Ciencias

Níquel (mg/kg)
1.13 2.5

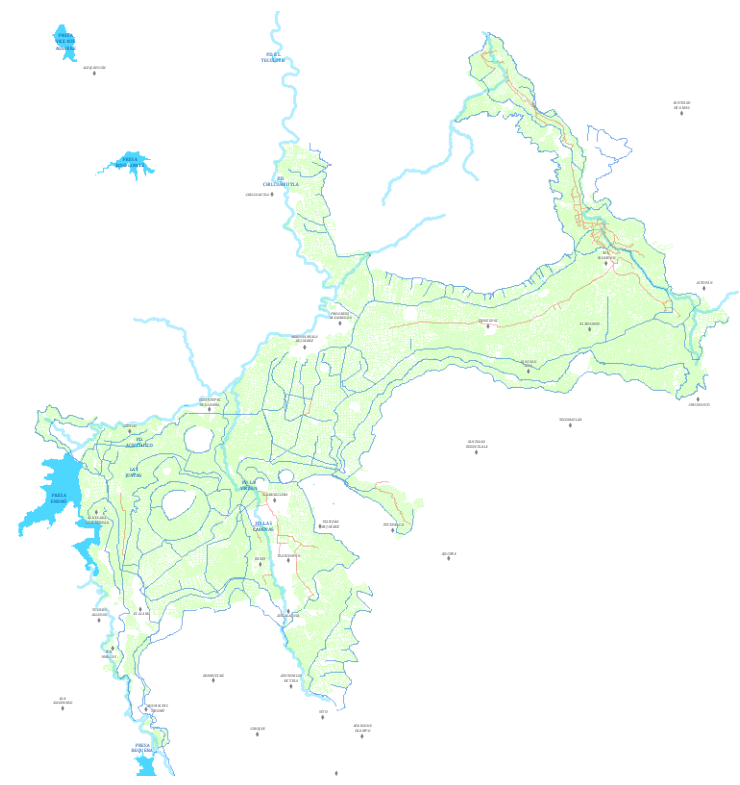


-- RESULTADOS DE AGUA --

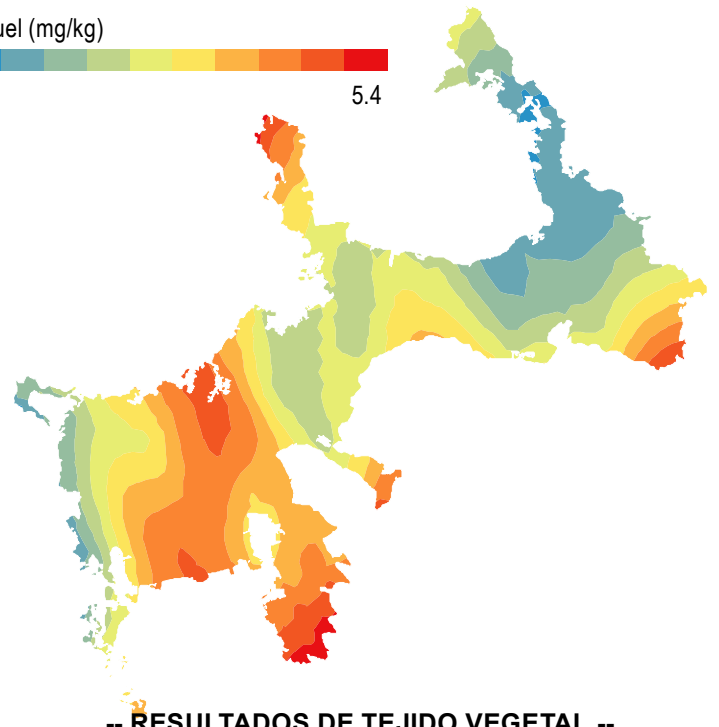
Níquel (mg/kg)
0.03 7.08



-- RESULTADOS DE SUELO --



Níquel (mg/kg)
0.9 5.4



-- RESULTADOS DE TEJIDO VEGETAL --

Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo

Ubicación



Sistema de coordenadas: GCS WGS 1984
Datum: WGS 1984
Unidades: Degree

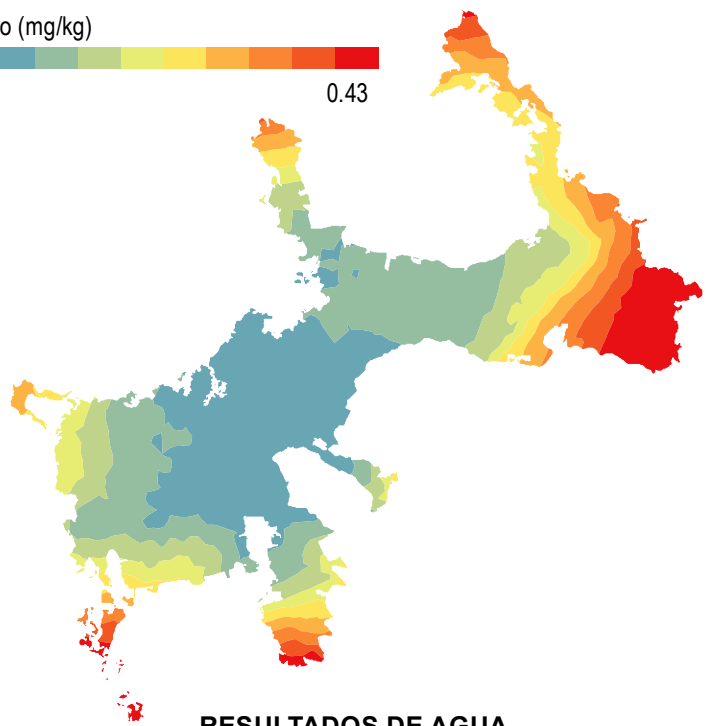
Escala 1 : 550,000
2 1 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
Km



DISTRIBUCIÓN GEOESPACIAL DE LOS MUESTREOS PLOMO

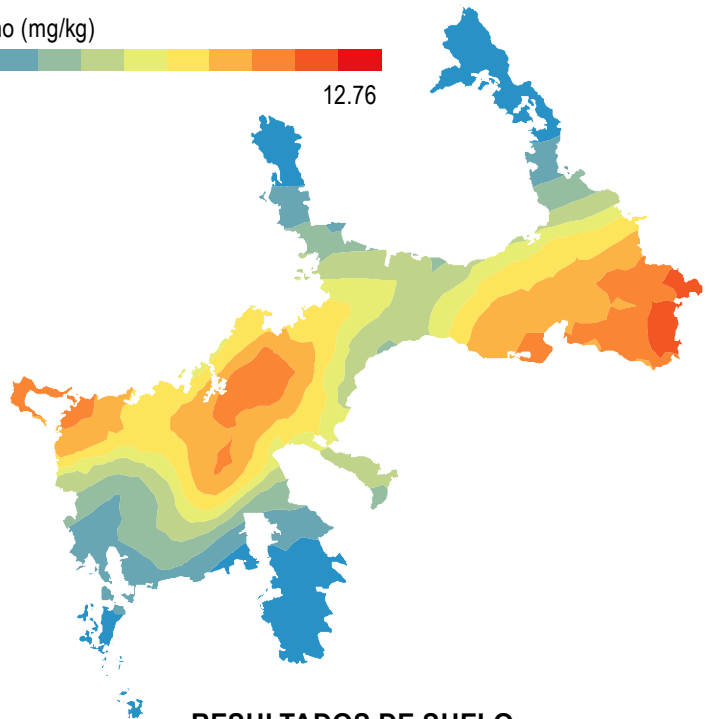
Elaboró Alejandra Flores Avalos
Para Tesis de Maestría en Ciencias

Plomo (mg/kg)
0.1 0.43

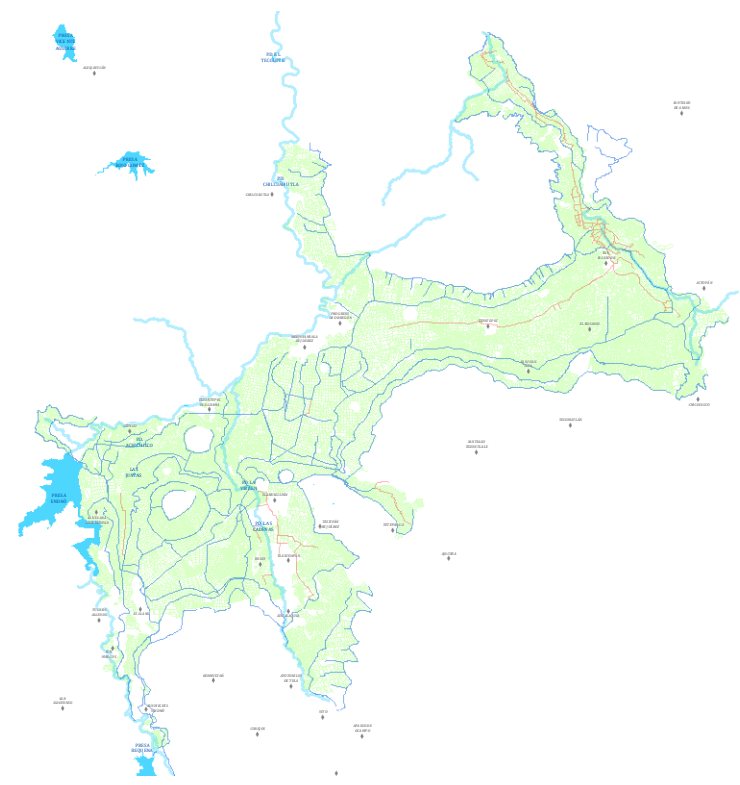


-- RESULTADOS DE AGUA --

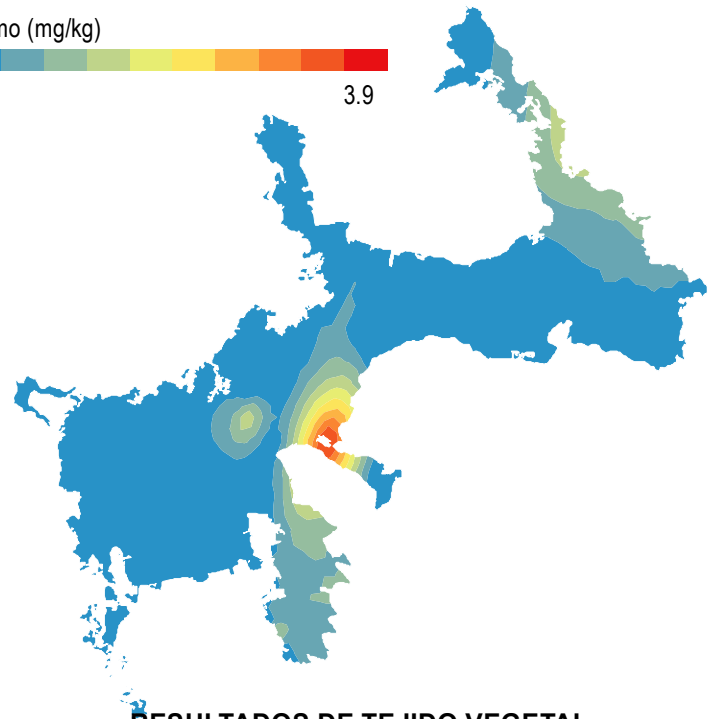
Plomo (mg/kg)
0.49 12.76



-- RESULTADOS DE SUELO --



Plomo (mg/kg)
0 3.9



-- RESULTADOS DE TEJIDO VEGETAL --

XI. Bibliografía

- Acosta Álvarez, M. M. (2007). Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hgo.
- Aguilar, J., C Dorronsoro, E Galan, A Gómez. (1999). Los criterios y estándares para declarar un suelo como contaminado en Anadalucía, la metodología y técnica de toma de muestra y análisis para su investigación. En Investigación y Desarrollo Medioambiental en Andalucía. OTRI. Universidad de Sevilla. 61-64.
- Altmann, M. C. (2007). Investigation-transfers-farmer's: articulation in the benefits of the technology transference process competitiveness. 2nd. edition. Stoneleigh, England, Plant Breeding Institute. Arable Series. 432 p.
- Antón D.J. y Díaz D.C. (2000). Sequía en un mundo de agua, Piriguazú Ediciones / CIRA-UAEM, San José / Toluca, 420 p.
- Ayers, R. S. y Westcot D.W. (1994). Water Quality for Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 1985 © FAO. IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER. 29 Rev.1. M-56 ISBN 92-5-102263-1
- Benítez, F. (1971). Los Indios de México. Tomo II. México: Ediciones ERA, S.A.
- Betancourt, P., Gaona, V., y Córdova, I. A. (2012). La contaminación de recursos naturales en el estado de Hidalgo, México. Contribuciones al conocimiento de la ecotoxicología y química ambiental en México.
- BGS (British Geological Survey)- CNA (National Water Commission of Mexico). (1998). Impact of Wastewater Reuse on Groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico, BGS Technical Report WD/95/24, Keyworth
- BOE. (2005). Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo y los Criterios y estándares para la Declaración de Suelos contaminados. Pp 11. BOE no 15 de 18 de enero de 2005, Madrid.
- Brizuela, J., y Jiménez, Y. (2012). Metodologías aplicadas para el establecimiento de los niveles de referencia para metales pesados en la evaluación de la contaminación en suelos. Avances en Química, (2), 101-109.
- Cajuste, L. J., R. Carrillo G., E. Cota G., and R. J. Laird. (1991). The distribution of metals from wastewater in the mexican Valley of Mezquital. Water, Air, and Soil Pollution 57-58: 763-771.
- Canter L.W. (1997). Nitrate in groundwater, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 259 p.
- Carrillo G., R. L. J. Cajuste y L. Hernández H. (1992). Acumulación de metales pesados en un suelo regado con aguas residuales. Terra 10: 166-173.
- Castillo, M., J Martin, R Jiménez. (2003). Estándares de calidad de los suelos del Campo de Montiel (ciudad real) en función del contenido en metales pesados. Edafología, 10(1), 23-32.

Cayetano, M., y Siebe, C. (2012). Transferencia suelo-planta de metales pesados en parcelas regadas con agua residual en el Valle del Mezquital. In XXII Congreso Nacional de Geoquímica (Vol. 18, No. 1, p. 21).

Chapela-Lara, M. (2010). Variabilidad temporal en el contenido de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Valle del Mezquital: México, DF, Universidad Nacional Autónoma de México (Doctoral dissertation, Tesis de maestría).

Cifuentes, E., U. J. Blumenthal, G. Ruiz-Palacios, S. Bennett y A. Peasey (1994), Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: el Valle del Mezquital, México, Salud Pública, México, 36 (1), pp. 3-9.

CNA. Comisión Nacional del agua. (1995). Programa hidráulico 1995-2000, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

Del Arenal-Capetillo, R. (1985). Estudio hidrogeoquímico de la porción centro-oriental del Valle del Mezquital, Hidalgo. Rev. Mex. Cienc. Geológ. 6: 86-87.

EPA. (1992). Guide to site and soil description for hazardous waste site characterization. Vol 1: Metals.

Flores Delgadillo L., Hernández Silva C., Alcalá Martínez R. y Maples Vermeersch M. (1992). Total contents of Cd, Cu, Mn, and Zn in agricultural soils irrigated with wastewater from Hidalgo, Mexico. Rev. Int. Contam. Ambient. 8,3746.

Flores-Delgadillo, L., Hernández-Silva, G., Alcalá-Martínez, R. y Maples-Vermeersch, M. (2012). Contenidos totales de cadmio, cobre, manganeso y zinc en suelos agrícolas regados con aguas residuales en el estado de Hidalgo, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 8(1), 37-46.

Flores-Magdaleno, H., Mancilla-Villa, O. R., Mejía-Saenz, E., del Carmen Olmedo-Bolaños, M., Bolaños, O., and Bautista-Olivas, A. L. (2011). Heavy metals In agricultural soils and Irrigation wastewater of Mixquiahuala, Hidalgo, Mexico. African Journal of Agricultural Research, 6(24), 5505-5511.

Garay, A. V. A., Sangerman-Jarquín, D. M., de Rindermann, R. S., Huato, M. Á. D., y Rivera, C. G. J. (2010). Fortalecimiento de la competitividad del sector agropecuario en Hidalgo. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 1(2), 229-241.

García Moctezuma, F. (2010). La planeación del desarrollo regional en México (1900-2006). Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, ISSN 0188-4611, Núm. 71, 102-121.

García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México: Offset Larios, S.A.

Gil Bartomeu, M. (2009). Estudio etnobotánico del sitio arqueológico Tula. Tula, Hidalgo: Universidad Nacional Autónoma de México.

González Romero, S. L. (2009). Germinación de Diferentes cultivos en condiciones de salinidad cuantitativa y cualitativa.

Gutiérrez Ángeles, S. y Silva de la Rosa, B.F. (1998). Aplicación de un modelo hidrogeoquímico en el Valle del Mezquital, Hidalgo. In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26 (AIDIS 98) (pp. 1-10). APIS.

Gutiérrez Ruiz M.E. (1982). Estudio del contenido de iones inorgánicos en suelos y plantas de los Distritos de Riego 03 y 88. Tesis de Maestría. Facultad de Química, UNAM, México D.F., 251 p.

Gutiérrez, A. D. R., López, S. S. S., Sandoval, O. A. A., y Soto, J. M. D. (2012). Estudio físico-químico y micromorfológico de suelos de Denganthza, Valle del Mezquital, Hidalgo. *Multiciencias*, 12(2), 146-155.

Hall W.D. (1992). Effects of nutrient management on nitrate levels in ground water near Nephra, Pennsylvania. *Ground Water* 30, 720-730.

Hernández Silva G., Maples Vermeersch M., Hernández Santiago D., Solorio Munguía G. y Villarreal. G. (1990). Tendencias en la acumulación de metales pesados en los suelos del Distrito de Desarrollo Rural 063, Edo. de Hidalgo, por efecto del riego con aguas negras. En: Memoria del 1er Simposio Nacional de Degradación del Suelo. Ed. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., pp. 4647.

Hudak P.F. (2000). Regional trends in nitrate content of Texas groundwater. *J. Hydrol.* 228, 37-47.

Hunter, R. (2 de mayo de 2014). Land Use Change in New Spain: A Three-Dimensional Historical GIS Analysis. *The Professional Geographer* Volumen 66, Issue 2, 260-273.

IMCO. Instituto Mexicano de la Competitividad. (2008). Índice mexicano de competitividad 2008.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2007). Sistema de Cuentas Nacionales de México.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2009). Censo agropecuario 2007. VIII censo agrícola, ganadero y forestal del estado de Hidalgo. México.

Jiménez, B., Chávez, A. (2004). Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: "El Mezquital Valley" case: *Water Science and Technology*, 50(2), 269-276.

King L.D. (1982). Land application of untreated industrial waste water. *J. Environ. Qual.* 11, 638-644.

León Estrada, K. (2010). Determinación de la remoción por adsorción del di-2-etilhexil ftalato (DEHF) en columna para los suelos, de importancia agrícola, del Valle de Tula. *Revista Sistemas Ambientales*, 3(1):59-73.

Lesser-Carrillo, L. E., Lesser-Illades, J. M., Arellano-Islas, S., y González-Posadas, D. (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 28(3), 323-336.

Marín, L. E., Steinich, B., Escolero, O., Leal, R. M., Silva, B. and Gutierrez, S. (1998), Inorganic Water Quality Monitoring Using Specific Conductance in Mexico. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 18: 156–162

- Martínez-Menchaca, A., Rodríguez-Ortega, A., Ventura-Maza, A., y Vargas-Monter, J. (2012). Adaptación de tres variedades de morera (*Morus spp.*) en el estado de Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(4), 671-683.
- Mascareño Castro F. (1974). Estudio preliminar sobre contaminación de suelos y la producción agrícola en el Distrito de Riego 03, por el uso de aguas negras de la Ciudad de México. Tesis de Maestría, Colegio de Posgraduados, Chapingo, México
- Mascareño, C., F. y R. Guajardo V. (1977). Estudio preliminar sobre contaminación de los suelos y de la producción agrícola en el distrito de riego 03 por el uso de aguas negras de la Ciudad de México. *Agrociencia* (27): 95-119.
- Maza, A. V., Viveros, F. M. L., y Muhammad, E. (2012). Uso de morera (*Morus alba*) en sistemas de agricultura de conservación (AC): una propuesta agroforestal para el estado de Hidalgo. *TÓPICOS SELECTOS DE SERICULTURA*, 2009, 57.
- Mejía, B., M., S. Sánchez B., G. Hernández S., L. Flores D., G. Villarreal L. y R. Guajardo V. (1990). Metales pesados en maíz, alfalfa y su correlación con los extractantes en suelos del DDR 063, Hgo. In: Primer Simposium Nacional de Degradación del Suelo. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. pp: 42-43.
- Melville, E. (5 de febrero de 1995). A Plague of Sheep: Environmental Consequences of the Conquest of Mexico. *Journal of Latin American Studies/ Volumen 27*, 221-222.
- Menchaca, L. B., y Byrne, R. (2012). Información estratigráfica de metales pesados en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 7(1), 91.
- Méndez G., T. (1982). Estudio sobre contaminación de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hgo., por boro y metales pesados por el uso de aguas negras de la Ciudad de México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM, México, D.F., 134 p.
- Mendoza, A. M., Chávez, P. M. V., Hernández, C. L. R., Téllez, M. H., Azul, C. E. C. (2013). Evaluación de la tolerancia de semillas de frijol y maíz. *Campus Hidalgo, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*.
- Núñez, B. J. (1999). Evaluación hidrológica de la cuenca de Zimapán y sus implicaciones con la presencia de arsénico. Informe final. IICT-Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. 113 p.
- Page, D., Dillon, P., Toze, S., Bixio, D., Genthe, B., Jiménez-Cisneros, B.E., Wintgens, T. (2010). Valuing the subsurface pathogen treatment barrier in water recycling via aquifers for drinking supplies: *Water Research*, 44(6), 1841-1852.
- Pavón, N. P., Ballato-Santos, J., y Pérez-Pérez, C. (2011). Germinación y establecimiento de *Mimosa aculeaticarpa* var. *biuncifera* (Fabaceae-Mimosoideae). *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(2), 653-661.
- Pérez Acosta, G. R., Ramírez Cortina, C. R., Vázquez González, K. A., y Ortiz Gallarza, S. M. (2002). Impactos al agro por los recursos hídricos en el Valle del Mezquital, Hidalgo. In Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, 13 (pp. 1-11). FEMISCA.

Ponce, D. A. y Sánchez, D. G. (2005). Construcción y manejo de invernaderos en la producción de jitomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill) para el Valle del Mezquital, Hidalgo. Directorio de la UACH 5:13-18.

Prieto García, F., Prieto Méndez, J., Callejas Hernández, J., Gutiérrez, R., Delia, A., y Méndez Marzo, M. A. (2010). Bioacumulación de arsénico en las etapas de desarrollo de la cebada maltera (*Hordeum distichon* L.). Revista mexicana de ciencias agrícolas, 1(1), 37-44.

Prieto G, Lucho CA, Poggi VH, Álvarez SM, Barrado EE (2007). Caracterización fisicoquímica y extracción secuencial de metales y elementos trazas en suelos de la región de Actopan-Ixmiquilpan del distrito de riego 03, Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Revista Ciencia ergo Sum, 14(1): 69-80.

Prieto-Méndez, J. A González, C González, A Román, F Prieto. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales Pesados provenientes de suelos y agua. Revisión. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10, 29-44.

Ramírez Flores, E., Robles Valderrama E., Ayala Patiño R., Martínez Rodríguez B., (2012). Calidad amebológica del agua de pozos utilizados para suministro de agua potable en el Estado de Hidalgo. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 16-3, pp 219-228

Ramírez-Fuentes, E., Lucho, C., Escamilla-Silva, E., Dendooven L. (2002). Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time: Bioresource Technology, 85(2), 179-187.

Reyes-Solís, I.E., C. Solís, K. Isaac-Olive, N.E. García, E. Andrade. (2009). Fractionation analysis of trace metals in humic substances of soils irrigated with wastewater in Central Mexico by particle induced X-ray emission, Microchemical Journal 91(1):129-132

Reynoso, S. C., Alcántara, A. L. N., Telles, M. H., y Azul, C. E. C. (2013). Autodepuración De La Presa Endhó En Hidalgo.

Rodarte García, R., & Granados Alcantar, J. (18-21 de octubre de 2011). Crisis del agua: Gestión y toma de conciencia de conservación del agua en el Valle del Mezquital. 16º Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México, AMECIDER. Veracruz, México: Universidad Veracruzana.

Rodarte García, R., Galindo Escamilla, E., Díaz Pérez, F., & Fernández Fernández, G. (2012). Gestión del Agua y Reconstrucción de la Naturaleza en el Valle del Mezquital. Hidalgo, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Rodríguez-Zavaleta, C. (1997). Guía para el cultivo de maíz de riego en el estado de Hidalgo. INIFAP-CIR Centro. Campo experimental Pachuca, 23 p.

Rojas Rabiela, T., Martínez, J., & Murillo, D. (2009). El agua en la antigua Mesoamérica: Usos, Tecnología y Organización Social. Cultura Hidráulica Y Simbolismo Mesoamericano Del Agua En El México Prehispánico, 298.

Ryan, A.J. y R.L. Chaney. (1994). Development of limits for land application of municipal sewage sludge: risk assessment. pp. 534-553. Volume 3a. Commission II. XV Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo. Acapulco, México.

Salgado, J. A. (2011). Región y desigualdades económico-sociales. El caso del valle de Toluca y el valle del Mezquital. Espacios Públicos, 14(32), 248-257.

Sánchez D., N. (1985). Mexican experience in using sewage effluent for large scale irrigation. In: Treatment and use of sewage effluent for irrigation. Pescod M.B. and A. Arar (eds.). Butterworths. Tiptree Essex, Great Britain. pp: 249-257.

SEMARNAP. (2000). Evaluación de Impacto Ambiental del Desarrollo Urbano del Valle de México. Dirección General de Ordenamiento Ecológico e Impacto Ambiental. Estudio de caso, el río Tula. pp. 1-13.

Siebe, C. (1994). Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 10(1), 15-21.

Siebe, C. (1995). Heavy metal availability to plants in soils irrigated with wastewater from México City. *Wat. Sci. Tech.* 32 (12): 29-34.

Silva-Mora, L. (1997). Geología volcánica y carácter químico preliminar de las rocas de la región Tula-Polotitlán, Estados de Hidalgo, México y Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, volumen 14, número 1, 50-77.

Solís, C., E. Andrade, A. Mireles, I.E. Reyes-Solís, N. García-Calderón, M.C. Lagunas-Solar, C.U. Piña, R.G. Flocchini. (2005). Distribution of heavy metals in plants cultivated with wastewater irrigated soils during different periods of time, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Volume 241 (1–4):351-355

Solis, C., K. Isaac-Olive, A. Mireles, M. Vidal-Hernandez. (2009). Determination of trace metals in cow's milk from waste water irrigated areas in Central Mexico by chemical treatment coupled to PIXE, *Microchemical Journal*, 91(1):9-12

Torres Romero, J. L. (2001). Potabilización del agua subterránea del Valle del Mezquital mediante membranas para el suministro a la Ciudad de México. México: Universidad Autónoma de México (UNAM).

Vázquez-Alarcón, A., Cajuste, L. J., Carrillo-González, R., Zamudio-González, B., Álvarez-Sánchez, E., y Castellanos-Ramos, J. Z. (2005). Límites permisibles de acumulación de Cadmio, Níquel y Plomo en suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Terra Latinoamericana*, 23(4), 447-455.

Ventura Maza, A., Lara Viveros, F., & Muhammad, E. (2012). Uso de morera (*Morus alba*) en sistemas de agricultura de conservación (AC): una propuesta agroforestal. Hidalgo, México: Alquimia diseño.

World Health Organization (WHO). (1985). Health hazards from nitrates in drinking water. In: Report on a WHO meeting in Copenhagen, march 5-9, 1984. Regional office for Europe, Copenhagen Denmark, 49-66.

World Health Organization (WHO). (1996). Trace elements in human nutrition and health. World Health Organisation. Geneva

Zambrano García, A. M. (8 de septiembre de 2009). Distribution and sources of bioaccumulative air pollutants at Mezquital Valley, Mexico, as reflected by the atmospheric plant *Tillandsia recurvata* L. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 6479-6494.