

~~0869~~
duplicado

CRITERIOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES EN RIEGO AGRICOLA EN MEXICO

MARIA TERESA ORTA LEDESMA

TESIS

Presentada en la División de Estudios de
Postgrado de la
FACULTAD DE INGENIERIA
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
como requisito para obtener
el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA
SANITARIA

CIUDAD UNIVERSITARIA JUNIO DE 1985.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



DEPTI

T. UNAM

1 9 8 5

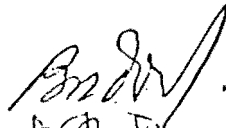
ORT

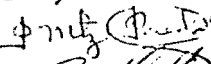
Ej. 2

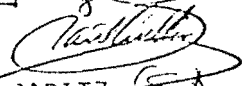
CRITERIOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES EN RIEGO AGRICOLA EN MEXICO

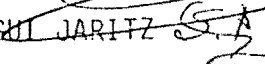
Créditos asignados a la tesis 10 (diez)

APROBADO POR EL JURADO:

Presidente: DR. UBALDO BONILLA DOMINGUEZ 

Vocal: DR. PEDRO MARTINEZ PEREDA 

Secretario: DR. RAUL CUELLAR CHAVEZ 

Suplente: M. en I. SALVADOR AYANECHI JARITZ 

Suplente: M. en C. FRANCISCO MONTEJANO URANGA 

INDICE

| | Página | |
|---------|---|----|
| 1.0 | INTRODUCCION | 1 |
| 1.1 | Objetivo | |
| 1.2 | Alcances | |
| 2.0 | ANTECEDENTES | 3 |
| 2.1 | Superficie estimada que se riega con agua residual en el país. | 7 |
| 2.2 | Revisión de los estudios realizados en México sobre el aprovechamiento de las aguas residuales en riego agrícola. | 13 |
| 2.2.1 | Información sobre el aprovechamiento del agua residual en riego en México. | 13 |
| 2.2.2 | Calidad del agua de riego y tipos de suelos y cultivos del Distrito de Riego 03. | 15 |
| 2.3 | Panorama de Información Internacional. | 25 |
| 3.0 | PARAMETROS PRESENTES EN AGUA RESIDUAL: Sus efectos en suelos y cultivos y riesgos indirectos. | 29 |
| 3.1 | Calidad agronómica | 29 |
| 3.1.1 | Características y efectos de los parámetros considerados en la calidad agronómica de las aguas residuales. | 31 |
| 3.2 | Calidad sanitaria | 38 |
| 3.2.1 | Contaminación biológica. | 38 |
| 3.2.2 | Agentes biológicos en cultivos y suelos. | 39 |
| 3.2.3 | Substancias Tóxicas. | 41 |
| 3.2.3.1 | Efectos de metales pesados en suelos y cultivos. | 42 |
| 3.3 | Riesgos a la salud de los animales que efectúan pastoreo en forrajes, regados con agua residual. | 49 |
| 3.3.1 | Tratamiento y medidas recomendadas. | 50 |
| 3.3.2 | Dispersión de microorganismos en aerosoles. | 50 |
| 3.4 | Características de las aguas residuales del país. | 52 |
| 4.0 | CLASIFICACION DE SUELOS Y SU INTERRELACION CON EL RIEGO CON AGUA RESIDUAL. | 55 |
| 4.1 | Clasificación de los suelos. | 55 |
| 4.2 | Propiedades de los suelos. | 59 |

| | Página | |
|-------|--|-----|
| 4.2.1 | Salinidad y sodicidad | 60 |
| 4.3 | Clases de suelos y su relación con el riego con agua residual. | 62 |
| 4.4 | Sistemas de aplicación de aguas residuales al suelo. | 65 |
| 4.5 | Comportamiento en el suelo de la salinidad, boro y metales pesados. | 70 |
| 4.6 | Criterios técnicos de la relación agua residual-suelo. | 71 |
| 5.0 | CRITERIOS TECNICOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. | 77 |
| 5.1 | Resumen de criterios | 77 |
| 5.1.2 | Criterios con respecto al tipo de suelo. | 81 |
| 5.1.3 | Criterios con respecto al tipo de riego y lámina de riego | 83 |
| 5.2 | Requerimiento de lavado | 85 |
| 5.3 | Criterios y recomendaciones de operación | 87 |
| 6.0 | METODOLOGIA PROPUESTA PARA EL ANALISIS DE LOS DISTRITOS DE RIEGO EXISTENTES Y SELECCION DE NUEVAS AREAS. | 91 |
| 6.1 | Ejemplo de aplicación de metodología propuesta. | 92 |
| 6.1.1 | Distrito de riego 30. Valsequillo, Pue. | 92 |
| 6.1.2 | Caracterización del distrito de riego. | 95 |
| 7.0 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. | 102 |

INDICE DE FIGURAS

| | Página |
|--|--------|
| 1. Croquis del aprovechamiento del agua residual en los distritos de riego DR-03 y DR-100. | 4 |
| 2. Localización de ciudades que utilizan agua residual en riego agrícola. | 8 |
| 3. Salidas de agua residual del Valle de México. | 12 |
| 4. Pozos y manantiales del Valle del Mezquital, Hgo. | 24 |
| 5. Localización de los distritos de riego en México que aprovechan agua residual en riego agrícola. | 58 |
| 6. Proporciones de arena, limo y arcilla y láminas - aprovechables en diferentes clases básicas de <u>texturas</u> de suelo. | 64 |
| 7. Sistema de riego por aspersión y por surcos y <u>caballones</u> . | 66 |
| 8. Sistema de riego por inundación o encharcamiento. | 67 |
| 9. Sistema de riego por infiltración percolación. | 69 |
| 10. Metodología propuesta para el análisis de los <u>Distritos</u> de riego existentes y selección de nuevas <u>áreas</u> . | 92 |

INDICE DE CUADROS

Página

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Ciudades que aprovechan sus aguas residuales en riego agrícola. | 5 |
| 2. | Sistemas de tratamiento por lagunas de estabilización. | 9 |
| 3. | Superficies actuales y potenciales de ciudades que actualmente disponen sus descargas, mediante riego agrícola con aguas residuales provenientes de zonas urbanas. | 10 |
| 4. | Relación de usuarios de agua residual proveniente del área metropolitana del Valle de México 1981. | 11 |
| 5. | Características físicoquímicas de las aguas de irrigación en el DR-03. | 16 |
| 6. | Cantidades de nutrientes del agua de irrigación del DR-03, para el Estrato 0-30 cm en Kg/ha. | 18 |
| 7. | Nutrientes necesarios para el crecimiento de algunos cultivos. | |
| 8. | Productividad media de algunos cultivos del DR-03 para los tipos de agua indicados. | 18 |
| 9. | Concentraciones de metales pesados en las aguas del DR-03. | 20 |
| 10. | Concentraciones de metales pesados en los suelos del DR-03. | 20 |
| 11. | Concentraciones de metales pesados en cultivos del DR-03 | 21 |
| 12. | Metales pesados en agua, forraje y leche del DR-03. | 21 |
| 13. | Morbilidad por enteritis y diarreas en el DR-03. | 22 |
| 14. | Calidad del agua de pozos y manantiales del DR-03. | 25 |
| 15. | Resumen de ciertas características de la reglamentación europea. | 27 |
| 16. | Clasificación del agua residual para riego agrícola. | 31 |
| 17. | Clasificación de aguas de riego por conductividad eléctrica. | 32 |
| 18. | Calidad de agua de riego de acuerdo a la salinidad efectiva y salinidad potencial. | 33 |
| 19. | Disminución de rendimiento de algunos cultivos en función de la conductividad eléctrica del agua de riego. | 34 |
| 20. | Clasificación de aguas de riego por contenido de boro. | 35 |
| 21. | Clasificación de aguas de riego según el contenido de cloruros. | 36 |
| 22. | Resumen de efectos en cultivos y suelos de algunos parámetros considerados en la calidad agronómica de las aguas residuales. | 37 |
| 23. | Tiempos de sobrevivencia de organismos patógenos en distintos medios. | 39 |
| 24. | Concentraciones máximas permisibles de metales pesados en agua para riego. | 43 |
| 25. | Resumen de efectos en cultivos y suelos de algunos parámetros considerados en la calidad sanitaria de las aguas residuales. | 48 |

| | | |
|-----|--|----|
| 26. | Concentraciones de enterovirus en aerosoles resultantes del riego por aspersión con aguas residuales. | 51 |
| 27. | Características de calidad del agua residual de poblaciones mexicanas mayores de 10 000 habitantes. | 54 |
| 28. | Principales características de unidades de suelo en el sistema FAO/UNESCO. | 56 |
| 29. | Tipos de suelos y principales cultivos de los distritos de riego que aprovechan actualmente aguas residuales en riego agrícola. | 57 |
| 30. | Clasificación de las partículas del suelo. | 55 |
| 31. | Relación entre las principales propiedades físicas de los suelos y las características hidrodinámicas. | 59 |
| 32. | Relación de la textura con el comportamiento hidrodinámico. | 60 |
| 33. | Clasificación de los suelos en función de la conductividad eléctrica y el porcentaje de sodio. | |
| 34. | Criterios que se proponen para el aprovechamiento de aguas residuales en riego agrícola. | 78 |
| 35. | Parámetros físicos y criterios para la selección de una zona de riego utilizando aguas residuales. | 81 |
| 36. | Criterios con respecto al tipo de suelos. | 82 |
| 37. | Criterios para la aplicación de tipo de riego. | 83 |
| 38. | Lámina que puede retener 10 cm de profundidad de diversos tipos de suelo. | 84 |
| 39. | Láminas de riego aplicadas durante el ciclo agrícola 1977. | 84 |
| 40. | Porcentajes que se aplican a la lámina de riego para obtener el agua necesaria de lavado dependiendo de la salinidad del agua de riego y de salinidad máxima tolerada en retornos agrícolas. | 86 |
| 41. | Calidad agronómica del agua residual procedente de San Martín Texmelucan. | 93 |
| 42. | Calidad agronómica del agua residual procedente de Puebla. | 94 |

CRITERIOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN RIEGO AGRICOLA EN MEXICO.

1.0 INTRODUCCION

La disposición final de las aguas residuales municipales es una de las mayores preocupaciones en cuanto a la conservación y aprovechamiento del recurso hidráulico, sobre todo en países como el nuestro, en los que no se cuenta con el apoyo económico suficiente para asegurar que las aguas residuales generadas reciban tratamientos específicos o que su disposición sea adecuada para evitar la contaminación de los recursos hídricos, sino que también existe una escasez importante de este vital recurso, en una gran extensión del territorio nacional.

Lo anterior implica la necesidad de considerar el aprovechamiento de las aguas residuales para riego agrícola con las siguientes ventajas:

- a) aprovechamiento de un recurso hidráulico importante.
- b) mejoramiento de la calidad del agua.
- c) recirculación de nutrientes
- d) conservación de energía
- e) reducción de los costos de inversión, operación y mantenimiento.

Este sistema, además contribuye a crear y preservar tierras húmedas en áreas con escasez de agua y puede incrementar considerablemente los rendimientos de los cultivos en determinados casos.

1.1 Objetivo

Este trabajo tiene como finalidad establecer un marco de referencia de aque-

Los aspectos que indiquen ventajas y desventajas del aprovechamiento del agua residual en riego agrícola en México basados en la información y experiencia en el país, complementándose con resultados obtenidos a nivel internacional. Lo anterior será resumido en una proposición de criterios específicos de operación para el mejor aprovechamiento de esta agua en nuestro país.

1.2 Alcances

El análisis anterior permitirá desarrollar una metodología en la cual se involucren los criterios para el uso y manejo de aguas residuales en riego agrícola, así como para incorporación de nuevas áreas en las que se puedan aplicar estas aguas para riego. También se pretende que esta metodología incluya aspectos de evaluación de las zonas ya existentes.

2.0 ANTECEDENTES

La disposición de las aguas residuales, principalmente de origen municipal, en suelos se práctica desde principios de siglo en nuestro país (ref.3). Entre otros países que también utilizan este sistema de disposiciones se incluyen: Alemania, Australia, Polonia, Chile, Francia, España, etc. Esto ha sido el resultado de la necesidad de disponer dichas aguas, evitando contaminar los cuerpos de agua receptores y aprovechar el agua para riego agrícola.

El uso del agua residual para riego agrícola en México, tiene sus orígenes a partir de la construcción de una salida para las aguas residuales del Valle de México. En el año de 1900 (ref.5); se comenzó a aprovechar estas aguas en la agricultura en la región del Valle del Mezquital, que después se establecería como el Distrito de Riego 03 (D.R.03), en Tula, estado de Hidalgo ampliándose a la fecha al Valle de Alfajayucan en el Distrito de Riego 100 Alfajayucan, Hgo. Dentro del Valle de México, algunas áreas ubicadas a lo largo del "Gran Canal del Desagüe", también aprovechan las aguas residuales originadas en la ciudad de México, principalmente el Distrito de Riego 088 Chalco-Chiconautla en el Estado de México (Ver FIGURA 1).

Otras regiones que aprovechan aguas residuales generadas en núcleos urbano-industriales son: los distritos de riego 030, en Valsequillo, estado de Puebla; 028, en Tulancingo, estado de Hidalgo, y el 09, en Ciudad Juárez, estado de Chihuahua. Además, las zonas agrícolas aledañas a otras 53 ciudades utilizan las aguas residuales generadas en ellas. En el CUADRO 1, se presenta una relación de estas ciudades además de otras características; en

CUADRO 1. CIUDADES QUE APROVECHAN SUS AGUAS RESIDUALES EN RIEGO AGRICOLA.

| C I U D A D | DEMANDA TOTAL Mm3/año | | | DESCARGA URBANA+INDUSTRIAL Mm3/año | | | POBLACION SERVIDA CON RED DE ABASTECIMIENTO % | | |
|--|--------------------------|--------|--------|---------------------------------------|---------|---------|--|------|------|
| | 1980 | 1990 | 2000 | 1980 | 1990 | 2000 | 1980 | 1990 | 2000 |
| 1. Area metropolitana de la Ciudad de México * | 1 979 | 2 688 | 3 342 | 1 385.3 | 1 881.6 | 2 339.4 | 91.3 | 96.1 | 98.4 |
| 2. Monterrey, N.L. 1/ | 350 | 533 | 868 | 245 | 373 | 607.6 | 90 | 92 | 95 |
| 3. Cd. Victoria, Tams. | 10 | 19 | 31 | 7 | 13.3 | 21.7 | 75 | 85 | 95 |
| 4. Aguascalientes, Ags. | 32.13 | 43.53 | 58.97 | 22.49 | 30.47 | 41.27 | 95 | 95 | 95 |
| 5. Ensenada, B.C.N. 2/ | 19 | 33 | 59 | 13.3 | 23.1 | 41.3 | 90 | 90 | 95 |
| 6. Mexicali, B.C.N. | 49 | 78.2 | 121.3 | 34.3 | 54.74 | 84.91 | 90 | 90 | 95 |
| 7. La Paz, B.C.S. | 9.0 | 14.0 | 21 | 3 | 4.66 | 7.0 | 90 | 90 | 95 |
| 8. Cd. Juárez, Chih. * | 105 | 162 | 222 | 73.5 | 113.4 | 155.4 | 84 | 95 | 95 |
| 9. Chihuahua, Chih. | 65 | 87 | 116 | 45.5 | 60.9 | 81.2 | 95 | 95 | 95 |
| 10. Delicias, Chih. | 11 | 16 | 25 | 7.7 | 11.2 | 17.5 | 75 | 85 | 95 |
| 11. Hidalgo del Parral, Chih. | 10 | 15 | 24 | 7 | 10.5 | 16.8 | 75 | 85 | 95 |
| 12. Monclova, Coah. 1/ | 71 | 116 | 179 | 49.7 | 81.2 | 125.3 | 95 | 95 | 95 |
| 13. Nueva Rosita, Coah. | 6 | 11 | 20 | 4.2 | 7.7 | 14.0 | 75 | 85 | 95 |
| 14. Piedras Negras, Coah. | 11 | 20 | 39 | 7.7 | 14.0 | 27.3 | 75 | 85 | 95 |
| 15. Saltillo, Coah. | 40 | 60 | 93 | 28 | 42 | 65.1 | 95 | 95 | 95 |
| 16. Torreón-Coah. G.Palacio,Dgo. | 122 | 219 | 322 | 85.4 | 153.3 | 225.4 | 83 | 87 | 95 |
| 17. Colima, Col. | 5.7 | 10.7 | 17.4 | 4.6 | 7.49 | 12.18 | 85 | 90 | 95 |
| 18. Durango, Dgo. | 29 | 50 | 84 | 20.3 | 35.0 | 58.8 | 87 | 90 | 95 |
| 19. Celaya, Gto. | 20.67 | 36.54 | 58.23 | 14.46 | 25.57 | 40.76 | 82 | 89 | 95 |
| 20. Guanajuato, Gto. 2/ | 6.08 | 7.54 | 9.71 | 4.25 | 5.28 | 6.79 | 82 | 89 | 95 |
| 21. Irapuato, Gto. | 20.80 | 33.32 | 51.22 | 14.19 | 23.32 | 35.85 | 93 | 94 | 95 |
| 22. León, Gto. | 71.95 | 102.4 | 165.29 | 50.36 | 71.68 | 115.70 | 91 | 93 | 95 |
| 23. Salamanca, Gto. | 120.92 | 150.48 | 198.13 | 84.64 | 105.33 | 138.69 | 63 | 80 | 95 |
| 24. Chilpancingo, Gro. 2/ | 5.3 | 12.1 | 26.8 | 3.71 | 8.47 | 18.76 | 88 | 91 | 95 |
| 25. Iguala, Gro. | 6.5 | 16.3 | 32.5 | 4.55 | 11.41 | 22.75 | 82 | 88 | 95 |
| 26. Pachuca, Hgo. | 11.58 | 22.15 | 52.21 | 8.10 | 15.50 | 36.54 | 90 | 92 | 95 |
| 27. Tula de A., Hgo. * | 5.44 | 12.69 | 30.74 | 3.80 | 8.88 | 21.52 | 83 | 89 | 95 |
| 28. Toluca, Méx. | 44.66 | 77.36 | 136.39 | 31.26 | 54.15 | 95.47 | 92 | 94 | 95 |
| 29. Morelia, Mich. | 28.52 | 47.91 | 81.97 | 19.96 | 33.53 | 57.38 | 87 | 91 | 95 |
| 30. Uruapan, Mich. | 18.3 | 27.0 | 37.0 | 12.81 | 18.9 | 25.9 | 87 | 91 | 95 |
| 31. Zamora, Mich. | 8.43 | 12.84 | 27.51 | 5.90 | 8.98 | 18.97 | 92 | 94 | 95 |
| 32. Cuautla, Mor. | 19.71 | 22.84 | 38.75 | 13.79 | 15.98 | 27.12 | 92 | 94 | 95 |
| 33. Juchitán de Z., Oax. 2/ | 8.8 | 15.3 | 28.8 | 6.16 | 10.71 | 20.16 | 70 | 75 | 95 |
| 34. Oaxaca, Oax. 2/ | 13.8 | 28.1 | 59.0 | 9.66 | 19.67 | 41.3 | 75 | 83 | 95 |

CONTINUACION CUADRO 1.

| C I U D A D | DEMANDA TOTAL Mm3/año | | | DESCARGA URBANA+INDUSTRIAL Mm3/año | | | POBLACION SERVIDA CON RED DE ABASTECIMIENTO % | | |
|-----------------------------|--------------------------|-------|--------|---------------------------------------|----------|----------|--|------|------|
| | 1980 | 1990 | 2000 | 1980 | 1990 | 2000 | 1980 | 1990 | 2000 |
| 35. Atlixco, Pue. | 3.73 | 7.96 | 16.84 | 2.61 | 5.57 | 11.79 | 77 | 86 | 95 |
| 36. Izúcar de M., Pue. | 2.05 | 4.17 | 9.82 | 1.43 | 2.92 | 6.87 | 65 | 80 | 95 |
| 37. Puebla, Pue. | 91.5 | 268.1 | 424.9 | 64.05 | 187.67 | 297.4 | 89 | 92 | 95 |
| 38. San Martín T., Pue. | 9.81 | 27.83 | 49.75 | 6.86 | 19.48 | 34.83 | 83 | 89 | 95 |
| 39. Tehuacán, Pue. | 7.8 | 18.7 | 42.1 | 5.46 | 13.09 | 29.47 | 55 | 75 | 95 |
| 40. Querétaro, Qro. | 27.89 | 69.57 | 133.21 | 19.52 | 48.69 | 93.24 | 86 | 90 | 95 |
| 41. Matehuala, S.L.P. | 12 | 14 | 22 | 8.4 | 9.8 | 15.4 | 92 | 94 | 95 |
| 42. San Luis Potosí, S.L.P. | 57 | 94 | 136 | 39.9 | 65.8 | 95.2 | 89 | 92 | 95 |
| 43. Culiacán, Sin. 2/ | 98.3 | 121.8 | 156.8 | 68.81 | 85.26 | 109.76 | 89 | 90 | 95 |
| 44. Guasave, Sin. 2/ | 3.5 | 7.0 | 7.9 | 2.45 | 4.9 | 5.53 | 47 | 90 | 95 |
| 45. Mazatlán, Sin. 2/ | 21.9 | 33.8 | 47.5 | 15.33 | 23.66 | 33.25 | 80 | 90 | 95 |
| 46. Cd. Obregón, Son. | 25.5 | 39.2 | 60.0 | 17.85 | 27.44 | 42.0 | 90 | 95 | 95 |
| 47. Navojoa, Son. 2/ | 5.1 | 9.6 | 12.9 | 3.57 | 6.72 | 9.03 | 62 | 90 | 95 |
| 48. Nogales, Son. | 11 | 16.6 | 21.3 | 7.7 | 11.62 | 14.91 | 80 | 90 | 95 |
| 49. San Luis R.C., Son. | 4.9 | 12.7 | 17.3 | 3.43 | 8.89 | 12.11 | 57 | 90 | 95 |
| 50. Nuevo Laredo, Tams. | 23 | 31 | 43 | 16.1 | 21.7 | 30.10 | 85 | 90 | 95 |
| 51. Apizaco, Tlax. | 4.0 | 9.7 | 27 | 2.8 | 6.79 | 18.9 | 93 | 94 | 95 |
| 52. Tlaxcala, Tlax. | 0.67 | 1.46 | 3.66 | 0.47 | 1.02 | 2.56 | 90 | 93 | 95 |
| 53. Córdoba, Ver. | 9.5 | 19.8 | 42.9 | 6.65 | 13.86 | 30.03 | 60 | 75 | 95 |
| 54. Jalapa, Ver. | 14.3 | 27.3 | 54.0 | 10.0 | 19.11 | 37.8 | 70 | 80 | 95 |
| 55. Orizaba, Ver. | 9.6 | 18.2 | 27.7 | 6.72 | 12.74 | 19.39 | 75 | 85 | 95 |
| 56. Fresnillo, Zac. | 4 | 8 | 12 | 2.8 | 5.6 | 8.4 | 92 | 93 | 95 |
| 57. Zacatecas, Zac. | 15 | 21 | 27 | 10.5 | 14.7 | 18.9 | 92 | 94 | 95 |
| De las Ciudades | | | | 1 269.7 | 2 041.66 | 3 303.29 | | | |
| Area metropolitana de la | | | | | | | | | |
| Ciudad de México | | | | 1 385.3 | 1 881.6 | 2 339.4 | | | |
| Descarga Total | | | | 2 655.0 | 3 923.26 | 5 133.3 | | | |

1/ Riego é industrial

2/ Parcialmente en riego agrícola.

* Se aprovecha el agua residual en distritos de riego.

NOTA: De las ciudades marcadas con 1/ y 2/ se estimó que se utiliza el 50% de la descarga en riego agrícola en los años de 1980, 1990 y 2000.

(Ref. 1).

la FIGURA 2 su localización en un mapa del país.

De las aguas residuales de estas 57 ciudades, sólo las descargas de 13 de ellas reciben algún tipo de tratamiento previo, involucrando pequeños volúmenes. En general, el tratamiento es a base de lagunas de estabilización. En el CUADRO 2 se indican las características y modalidades de este sistema de tratamiento.

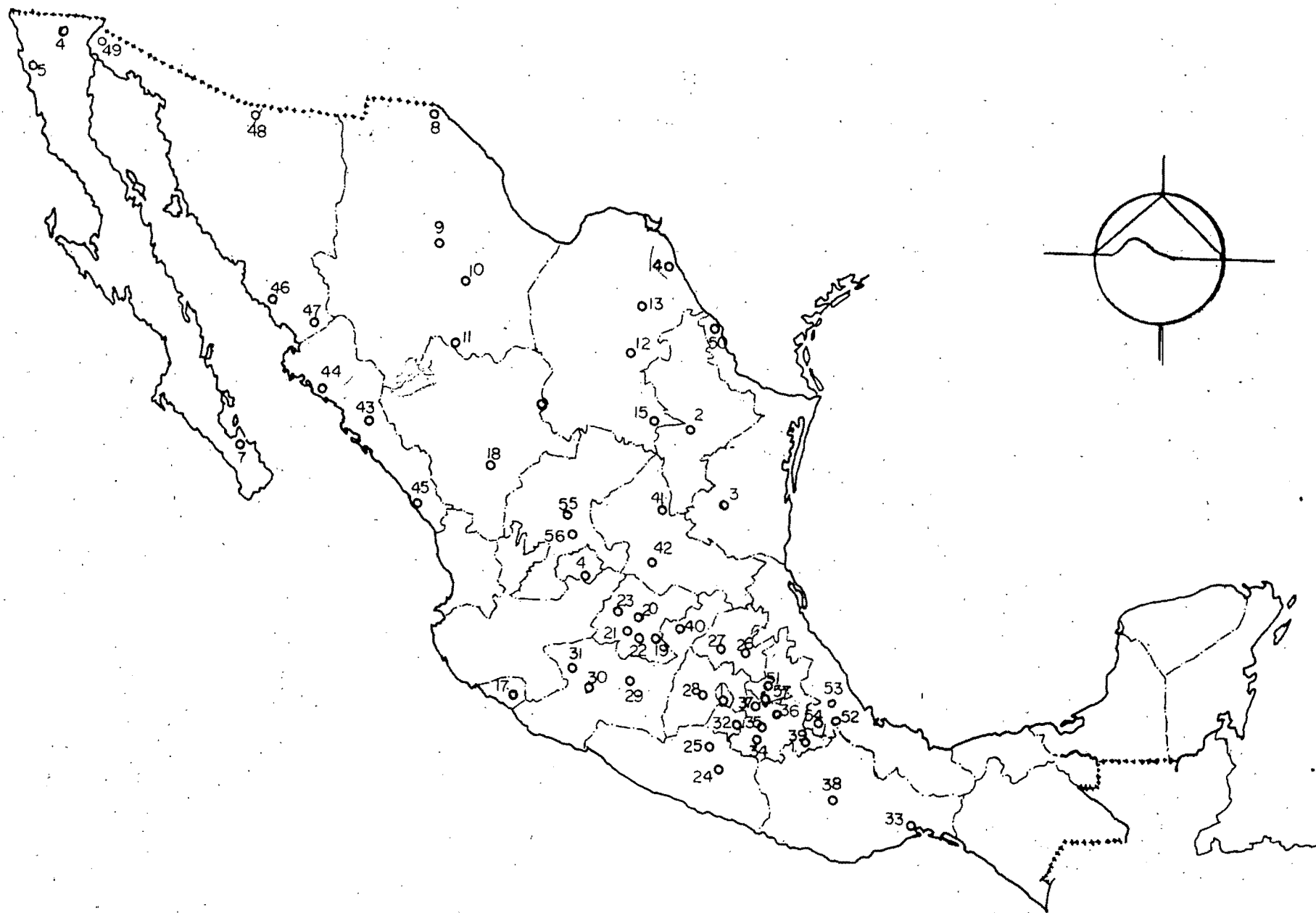
En ninguna de las descargas de efluentes tratados existe algún tipo de supervisión de la calidad del agua ofrecida y el mantenimiento de las plantas es prácticamente inexistente. En el resto de las superficies agrícolas el riego se hace con agua residual cruda.

2.1 Superficie estimada que se riega con agua residual en México.

En 1980 (ref. 20), se aprovecharon las descargas de aguas residuales para regar una superficie total de 192 936 ha. De ésta, el 35% corresponde a la superficie habilitada por el aprovechamiento de la descarga procedente del Area Metropolitana de la Cuenca del Valle de México (AMCVM). En el CUADRO 3 se muestra el aprovechamiento actual y el potencial que existe hasta el año 2000 de las descargas del AMCVM y de las ciudades restantes.

La superficie habilitada hasta 1980 por el aprovechamiento de aguas residuales representa con respecto al total regado en el país un porcentaje muy bajo .04% pero este se hace importante en donde no existe otro tipo de oferta de agua para riego.

FIGURA 2. LOCALIZACION DE CIUDADES QUE UTILIZAN AGUA RESIDUAL EN RIEGO AGRICOLA.



CUADRO 2. SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR LAGUNAS DE ESTABILIZACION.

| PARAMETRO | TIPO DE LAGUNA | | | |
|---|------------------------|--|-----------------------------------|------------------------|
| | Aeróbica | Aeróbica-Anaeróbica | Anaeróbica | Laguna Aerada |
| Régimen de Flujo | Mezclado | | | Completamente Mezclado |
| Operación | Serie o paralelo | Serie o paralelo | Serie | Serie o paralelo |
| Tiempo de retención en días | 10 - 40 | 7 - 30 | 20 - 50 | 3 - 10 |
| Profundidad en m | 0.9 - 1.2 | 0.9 - 1.8 | 2.4 - 4.6 | 1.8 - 6.1 |
| pH | 6.5 - 10.5 | 6.5 - 9.0 | 6.8 - 7.2 | 6.5 - 8.0 |
| Carga: DBO ₅ kg/ha/día | 11.0 - 22.0 | 2.8 - 9.2 | 36.8 - 92.0 | |
| Principales productos de conversión | Algas, CO ₂ | Algas, CO ₂ , CH ₄ | CO ₂ , CH ₄ | CO ₂ |
| Sólidos suspendidos en el efluente (mg/l) * | 140 - 340 | 160 - 400 | 80 - 160 | 260 - 300 |

* Incluye algas, microorganismos y sólidos suspendidos.
(Ref. 61).

Este sistema de tratamiento se aplica a las aguas residuales de las ciudades de Durango, Reynosa, León, Colima, La Paz, Mexicali-Durango.

CUADRO 3. SUPERFICIES ACTUALES Y POTENCIALES DE RIEGO AGRICOLA CON AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE ZONAS URBANAS.

| | <u>1980</u> | <u>1990</u> | <u>2000</u> |
|---|-------------|-------------|-------------|
| Descarga del área metropolitana de la cuenca del Valle de México en Mm ³ /año. | 1 385.3 | 1 881.6 | 2 339.4 |
| Lámina de riego (m) <u>2/</u> | 2.10 | 1.60 | 1.55 |
| Superficie de riego en ha. | 65 966.0 | 117 600.0 | 150 929.0 |
| Descarga de otras ciudades en Mm ³ | 1 269.7 | 2 041.66 | 330 329 |
| Lámina de riego (m) <u>1/</u> | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Superficie de riego en ha | 126 970 | 204 166 | 330 329 |
| Superficie total de riego | 192 936 | 321 766 | 481 258 |

1/ La lámina de riego supuesta corresponde a la promedio utilizada en los estados, más el 10% por el uso de agua residual.

2/ De acuerdo con las láminas de riego publicadas para el uso de los efluentes en la cuenca del río Tula. (Ref. 60).

Es importante hacer notar que las estimaciones de los CUADROS 1 y 3 incluyen tanto la descarga urbana como la industrial; en el caso de que se promueva en un futuro en las ciudades consideradas el reuso industrial, las cifras de oferta de agua residual se verían disminuídas lo mismo que el número de hectáreas posibles de riego con agua residual.

El caso específico y más ampliamente estudiado, es el del aprovechamiento de las aguas residuales generadas en el área metropolitana de la ciudad de México. Estas se utilizaron, sin tratamiento formal, para regar en 1981 cerca de 85 mil hectáreas: 10 400 ha en el Valle de México, 45 000 ha en el Valle del Mezquital y 30 000 ha en el Valle de Afajayucan. Estas zonas de riego extraen 1 683 millones de metros cúbicos por año (53 m³/seg) y aprovechan, además del efluente del Valle de México, el aporte por cuenca directa del

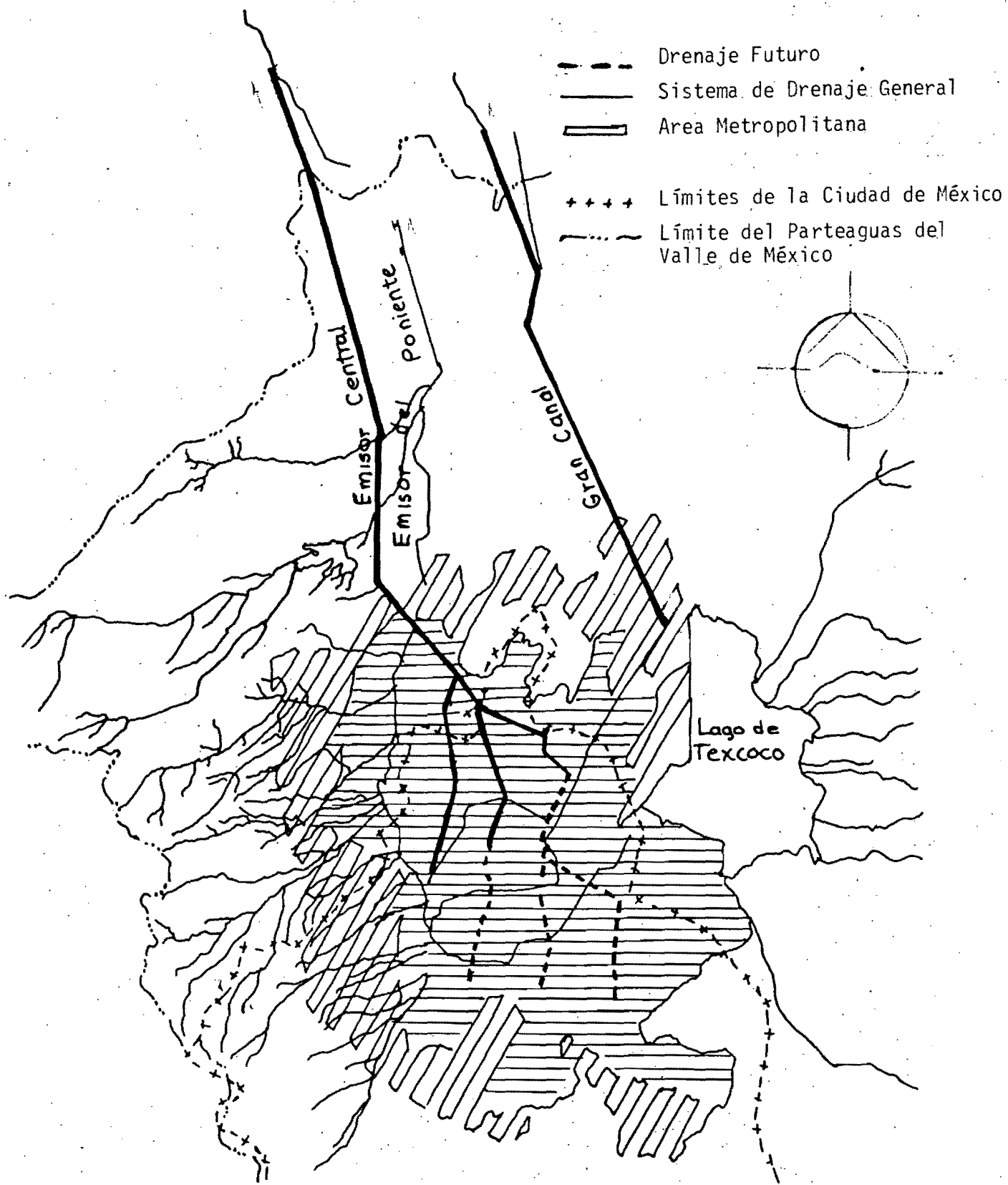
río Tula y los retornos agrícolas, (ref.6). En el CUADRO 4 se muestra una relación de usuarios de ambas cuencas en 1981. En el Valle del Mezquital, se localiza el Distrito de Riego 03 (D.R.03) Tula, con una superficie de -- 42 800 Ha, que utiliza un volumen de aguas residuales de 903 Mm³/año provenientes del "Gran Canal del Desague", del Emisor del Poniente y del Emisor Central; de éstos, los dos primeros son conductos a cielo abierto y el tercero, es un conducto cerrado, FIGURA 3.

CUADRO 4. RELACION DE USUARIOS DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL AREA METROPOLITANA DEL VALLE DE MEXICO, 1981.

| Z O N A | SUPERFICIE (Ha) | USO AGRICOLA | | GASTO (m ³ /s) |
|--|--------------------|----------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | | LAMINA BRUTA (cm) | VOLUMEN (Mm ³) | |
| <u>I. CUENCA VALLE DE MEXICO</u> | | | | |
| U.R.D.R. (Gran Canal) 1/ | 1 500 | 102 | 15.3 | 0.49 |
| Chiconautla | 5 150 | 112 | 57.7 | 1.83 |
| U.R.D.R. (E. Poniente) | 2 654 | 102 | 27.2 | 0.86 |
| Chalco | 1 160 | 109 | 15.1 | 0.48 |
| Total: | 10 464 | - | 115.3 | 3.66 |
| <u>II. CUENCA RIO TULA (Orígenes-Derivadora Chilcuautla)</u> | | | | |
| Tequisquiác | 1 123 | 120 | 13.5 | 0.40 |
| Taxhimay | 800 | 130 | 10.4 | 0.30 |
| Requena | 1 003 | 240 | 34.1 | 0.76 |
| Tula D.R.03 | 42 895 | 240 | 1 029.6 | 32.65 |
| Alfajayucan D.R.100 | 19 525 | 170 | 331.9 | 10.50 |
| Xotho y Gaxhido | 5 300 | 70 | 37.0 | 1.17 * |
| Total: | 65 346 | - | 1 409.5 | 44.61 |
| * Se riega con retornos. | | | | |
| <u>III. CUENCA RIO TULA (Derivadora Chilcuautla-Río Moctezuma)</u> | | | | |
| Chilcuautla | 5 560 | 170 | 94.5 | 3.0 |
| Tecolote | 1 124 | 170 | 19.1 | 0.6 |
| López Rayón-F. Angeles | 2 600 | 170 | 44.2 | 1.4 |
| Total: | 9 284 | - | 157.8 | 5.0 |

1/ U.R.:D.R. - Unidades de riego y distritos de riego. Se consideran como - Unidades de riego pequeñas áreas dominadas por obras de infraestructura hidráulica y manejadas por los propios productores (ref. 6).

FIGURA 3. SALIDAS DE AGUA RESIDUAL DEL VALLE DE MEXICO.



2.2 Revisión de los estudios realizados en México sobre el aprovechamiento de las aguas residuales en riego agrícola.

La revisión de la mayoría de los estudios realizados en México, que contemplan directa o indirectamente los diversos aspectos relacionados con el riego agrícola utilizando aguas residuales, indica que aún siendo el riego con aguas residuales una práctica común y extensiva en nuestro país, únicamente se han realizado estudios serios en las zonas aledañas al área metropolitana de la Ciudad de México (D.R. 03, D.R.88, D.R.100, Lago de Texcoco, Xochimilco) (ref. 3,7,9,12) y en General Escobedo, que utiliza las aguas residuales de la ciudad de Monterrey en el estado de Nuevo León. (Ref.8,10). El caso del Distrito de Riego 03 ha sido ampliamente estudiado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) desde 1960, así como por otras dependencias como la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH) (ref.7,8,9,10,11) y la Universidad Nacional Autónoma de México 1970-1972 (UNAM) (ref. 12,13).

Debido a lo anterior se consideró importante analizar la situación actual del riego agrícola con aguas residuales en el D.R.03 con el objeto de establecer un marco de referencia de todos aquellos aspectos que indiquen las ventajas y desventajas del aprovechamiento de estas aguas; que se presentan en el punto 2.2.2. Lo anterior se puede extrapolar a otras zonas de la República Mexicana en donde ya se practica este tipo de riego para recomendar medidas para su mejor aprovechamiento en base a las condiciones locales y de las características específicas, tipo de agua residual y de tipo de suelo. Asimismo, se analiza la factibilidad de incorporar nuevas zonas para riego con estas aguas.

2.2.1 Información sobre el aprovechamiento del agua residual en riego en México.

A continuación se presentan los aspectos relevantes que se tratan en los estudios revisados, dos de los cuales se efectuaron cubriendo épocas de lluvias

y estiaje. (Ref. 14).

- 1.- Programas hidráulicos del aprovechamiento en riego agrícola de los -
efluentes del Valle de México (ref. 6, 14).
- 2.- Análisis físicoquímicos y bacteriológicos de las aguas negras procedentes
del área metropolitana de la Ciudad de México (ref. 3, 13,15).
- 3.- Efectos que produce el almacenamiento prolongado de las aguas negras
(ref. 5, 16).
- 4.- Análisis físicoquímicos y bacteriológicos de suelos y de productos re-
gados con aguas negras en el D.R. 03, así como de la leche de vacas ali-
mentadas con alfalfa procedente de este mismo distrito (ref. 5, 7, 12,
17, 18).
- 5.- Efectos del agua residual en la productividad de cultivos del D.R. 03
y D.R. 88 (ref. 12, 17, 18, 19).
- 6.- Interacción del agua de riego con el agua subterránea (ref. 20, 21).
- 7.- Anteproyecto de reglamento para el aprovechamiento del agua residual
en riego agrícola (ref. 3, 22).
- 8.- Estudio de 42 ciudades de la República Mexicana, identificándose si de
acuerdo con las características de cada zona, el riego con aguas negras
es recomendable o condicionado (ref. 23).
- 9.- Diversos artículos publicados por organismos federales en los cuales
se enmarca la necesidad de regular el riego agrícola con aguas resi-
duales en México (ref. 19, 24).
- 10.- Evaluación bacteriana en vegetales irrigados con agua residual en Xo-
chimilco, Distrito Federal (ref. 25).

Las conclusiones de carácter general que se derivan del análisis de las referencias citadas son las siguientes:

Como en México las aguas residuales de muchas ciudades fueron concesionadas antes de que la Ley Federal de Aguas las especificara y regulara como tales; y por otro lado la preferencia de los agricultores por éstas sobre el agua clara, la práctica común y extensiva es la de aprovechar las aguas residuales en el riego de productos agrícolas sin que exista aparentemente ningún control de tipo sanitario; de ahí que se ha planteado la necesidad de elaborar y aplicar criterios, reglamentos y normas para el uso y aprovechamiento de dichas aguas.

Por otro lado aunque no se ha demostrado en forma concluyente, se ha planteado la asociación del alto porcentaje de gastroenteritis en México, que ocupa el primer lugar como causa de enfermedad y el segundo lugar como causa de muerte de acuerdo con las estadísticas al riego no controlado con aguas residuales (ref. 61).

2.2.2 Calidad del agua de riego y tipos de suelos y cultivos del Distrito de Riego 03 (D.R.03).

Como se mencionó anteriormente este distrito ha sido el más ampliamente estudiado en México a través de la historia, por lo que se considera importante resumir e integrar aquellos aspectos que permitan establecer una evaluación del aprovechamiento de aguas residuales en riego. Los valores de los parámetros que se indican en los cuadros subsecuentes son tomados literalmente de las referencias correspondientes, aunque en algunos casos carezcan de consistencia. Sin embargo, es la única información cuantitativa disponible en México.

En el D.R.03 se utilizan tres tipos de agua de riego: blanca o agua de primer uso, mezclada (25% agua blanca + 75% agua negra) y negra. Sus características, de acuerdo con algunos parámetros, se indican en el CUADRO 5.

CUADRO 5. CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DE LAS AGUAS DE IRRI-GACION EN EL D.R. 03. (Muestras efectuados en el período Julio-Diciembre de 1974).

| Parámetro | Datos promedio en el agua | | |
|---|---------------------------|--------|----------|
| | Negra | Blanca | Mezclada |
| . Conductividad eléctrica ($\mu\text{mh/cm}$) | 1 726 | 804 | 1 473 |
| . Sólidos disueltos (mg/l) | 1 373 | 607 | 1 218 |
| . Demanda bioquímica de oxígeno (mg/l) | 172 | 48 | 184 |
| . Nitrógeno Amonical (mg/l) | 10 | 3.3 | 7.7 |
| . Nitrógeno de Nitratos (mg/l) | 0.17 | 0.40 | 0.93 |
| . Fosfatos totales | 26 | 7.2 | 14.0 |
| . Boro | 1.31 | 0.256 | 1.18 |
| . RAS | 10.5 | 1.60 | 7.8 |

(Ref. 12).

* Este valor puede ser el resultado de errores en la determinación respectiva. En la Ref. (62) aparecen correcciones a los valores de DBO, N-NH_3 y N-NO_3 de 49, 3.7, 0.51, respectivamente con el agua negra.

Desde el punto de vista de salinidad, las aguas negras y mezcladas son altamente salinas y las blancas medianamente salinas. Las dos primeras no son recomendables para ser utilizadas en suelos con drenaje deficiente y en caso de que ello ocurra, se hace necesario implantar prácticas especiales de control de salinidad como la aplicación de aditivos, por lo general orgánicos (24); el agua blanca es susceptible de utilizarse en todo tipo de suelos sin requerir prácticas especiales de control de salinidad y es adecuada para el desarrollo de plantas de moderada tolerancia a las sales. En el Distrito de Riego 03, no es necesario todavía utilizar prácticas de control de salinidad, debido a que la materia orgánica contenida en las aguas mezcladas y negras reduce o nulifica los efectos de las mismas permitiendo inclusive la producción de cultivos altamente sensibles a las sales, tales como las hortalizas y el frijol, que en condiciones extremas llegan a resistir hasta 2 500 mg/l

de sales. (Ref. 21).

Por lo que respecta al sodio, cuyos efectos son medidos por la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), las aguas negras presentan sodicidad media y las blancas y mezcladas sodicidad baja. Los límites mínimo y máximo que clasifican un agua de sodicidad baja, están dados por valores de la RAS de 0 y 10, respectivamente, y los límites correspondientes para sodicidad media, se encuentran en el intervalo de 10 a 18; el agua de sodicidad baja no causa efectos nocivos sobre la mayoría de los suelos y cultivos y la de sodicidad media resulta peligrosa en suelos de textura fina, a menos que estos sean suficientemente permeables y contengan materia orgánica. (Ref.27). En el caso del D.R.03, el acondicionamiento con materia orgánica de los suelos de cultivo, ha resultado en una mejoría de la capacidad de reducción de los efectos del sodio, que por otra parte aún en el caso de las aguas negras, muestra valores cercanos a los característicos de aguas de baja sodicidad.

Por otra parte, el uso de aguas residuales favorece la "fertilización" de los suelos, al aportar cantidades importantes de nutrientes tales como nitrógeno, fósforo y potasio; en el CUADRO 6, se presentan la aportación de nutrientes de cada tipo de agua:

CUADRO 6. CANTIDADES DE NUTRIENTES EN SUELOS DEL DISTRITO DE RIEGO 03 PARA EL ESTRATO 0-30 CM EN Kg/Ha.

| Tipo de Agua | Aportación de nutrientes (Kg/Ha) | | |
|--------------|----------------------------------|---------|---------|
| | Nitrógeno | Fósforo | Potasio |
| . Blanca | 6.25 | 100 | 300 |
| . Mezclada | 4.32 | 96.7 | 400 |
| . Negra | 7.78 | 93.1 | 200 |

(Ref. 12).

La cantidad de nutrientes adicionada con el agua de irrigación, cubre en muchos casos los requisitos de nutrientes de algunos cultivos, entre los que se cuentan los señalados en el CUADRO 7, que además son predominantes en el D.R.03.

CUADRO 7. NUTRIENTES NECESARIOS PARA EL CRECIMIENTO DE ALGUNOS CULTIVOS.

| Cultivo | Requerimientos Kg/Ha | | |
|---------|----------------------|---------|---------|
| | Nitrógeno | Fósforo | Potasio |
| Alfalfa | 226 | 51 | 226 |
| Trigo | 95 | 38 | 63 |
| Maíz | 296 | 115 | |

(Ref. 12).

De acuerdo a análisis estadísticos, la productividad media de algunos cultivos regados con agua negra mezclada y blanca no difiere significativamente a un nivel de confianza del 99%, lo que indica que las aguas negras y mezcladas no alteren el desarrollo de las plantas, a pesar del grado de contaminación que presentan. En el CUADRO 8 se observa la productividad de los cultivos sujetos al análisis estadístico, que involucra datos de cinco ciclos agrícolas, comprendidos entre los años de 1970 a 1975. (Ref. 15).

CUADRO 8. PRODUCTIVIDAD MEDIA DE ALGUNOS CULTIVOS DEL D.R.03, PARA LOS TIPOS DE AGUA INDICADOS.

| Cultivo | Productividad Ton/Ha | | |
|----------|----------------------|--------|----------|
| | Negra | Blanca | Mezclada |
| Alfalfa | 87 | 79 | 91 |
| Maíz | 3.5 | 2.6 | 3.8 |
| Jitomate | 15.3 | 17.8 | 22 |
| Avena | 17.0 | 14 | 19 |

(Ref. 12).

Por lo que respecta al contenido de tóxicos como el Boro, las concentraciones promedio determinadas, para agua negra, mezclada y blanca son de 1.31, 1.18 y 0.256 mg/l, respectivamente. Los cultivos semitolerantes al Boro (0.7-2.5 mg/l de Boro), no son seriamente afectados, ya que el frijol, jitomate, cebada, trigo, maíz y calabacita, resisten incluso el riego con agua negra. Por otra parte, los cultivos tolerantes al Boro como la alfalfa, haba, cebolla, nabo, col, lechuga y remolacha son aún menos afectados, ya que el rango de sensibilidad se encuentra entre 1.6 y 4 mg/l.

Como se ha visto existen beneficios tangibles por el uso de agua residual en el riego de zonas de escasa disponibilidad de agua. Sin embargo, también ocurren acontecimientos adversos, fundamentalmente representados por la contaminación con metales pesados y organismos patógenos, que degradan la calidad de los cultivos y ejercen daños sobre la salud de los consumidores directos; es decir, el ganado que se alimenta del forraje contaminado o el hombre que ingiere verduras y productos derivados del ganado en condiciones de calidad inadecuadas.

La contaminación por metales pesados en el agua para irrigación, suelos y cultivos se intensifica en los últimos. Las concentraciones de metales pesados en las aguas negras, mezcladas y blancas exceden en un gran número de casos a los valores normativos para aguas de irrigación, del Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Agua vigente en México, así como los establecidos en la legislación de Estados Unidos de Norteamérica. Esta situación se visualiza en el CUADRO 9. (Ref. 12). Como se aprecia en el cuadro los valores de cadmio superan en todos los casos los recomendados, lo que representa un serio problema por su carácter acumulativo y persistente.

CUADRO 9. CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS EN LAS AGUAS PARA IRRIGACION EN EL D.R. 03.

| Parámetro | Concentraciones en mg/l | | | Reglamento de México (1) | Normas de E.U.A. (2) |
|-------------|-------------------------|----------|--------|--------------------------|----------------------|
| | Negra | Mezclada | Blanca | | |
| . Plomo | 0.161 | 0.130 | 0.047 | 5.0 | 5.00 |
| . Mercurio | 0.002 | 0.002 | 0.0005 | - | - |
| . Cadmio | 0.030 | 0.040 | 0.101 | 0.005 | 0.005 |
| . Cobre | 0.186 | 0.124 | 0.285 | 1.000 | 0.200 |
| . Niquel | 0.103 | 0.143 | 0.072 | - | 0.500 |
| . Zinc | 0.540 | 0.136 | 0.027 | - | 0.500 |
| . Cromo | 0.145 | 0.139 | 0.027 | - | 0.005 |
| . Manganeso | 0.177 | 0.290 | 0.049 | - | 2.000 |

(Ref. 12).

(1) Reglamento para la prevención y control de la contaminación. SARH, 1973.

(2) U.S. Federal Water Pollution Control Administration Water Quality Criteria, 1968.

Las concentraciones detectadas de metales pesados en los suelos del D.R.03, bajo las diferentes condiciones de riego, se encuentran representadas en el CUADRO 10.

CUADRO 10. CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS EN SUELOS DEL D.R.03

| Metal | Concentraciones en partes por millón en suelos regados con agua | | |
|-------------|---|----------|--------|
| | Negra | Mezclada | Blanca |
| . Plomo | 3.080 | 1.900 | 1.950 |
| . Mercurio | 0.026 | 0.035 | 0.054 |
| . Cadmio | 0.354 | 0.408 | 0.267 |
| . Cobre | 0.767 | 0.555 | 0.620 |
| . Niquel | 4.658 | 1.653 | 1.900 |
| . Zinc | 2.975 | 12.470 | 4.480 |
| . Cromo | 0.602 | 0.493 | 0.028 |
| . Manganeso | 34.090 | 22.47 | 25.600 |

(Ref. 12)

Las aguas contaminadas con metales pesados a su vez contaminan los cultivos producidos en el D.R.03, afectando seriamente la calidad toxicológica de los mismos. La naturaleza acumulativa de estos metales restringe su eliminación y en consecuencia mientras más tiempo esté sujeto el cultivo al riego con agua contaminada, mayor será la cantidad de metales pesados que incorpore.

Las concentraciones detectadas en alfalfa y jitomate bajo las tres condiciones de riego, se muestran en el CUADRO 11.

CUADRO 11. CONCENTRACIONES EN PPM DE METALES PESADOS EN CULTIVOS DEL D.R. 03.

| Parámetro | CULTIVO Agua de riego | Concentración en partes por millón: | | | | | |
|-------------|--------------------------|-------------------------------------|----------|--------|-----------------|----------|--------|
| | | A L F A L F A | | | J I T O M A T E | | |
| | | Negra | Mezclada | Blanca | Negra | Mezclada | Blanca |
| . Plomo | | 19 | 26 | 30 | - | - | - |
| . Mercurio | | 0.06 | 0.15 | 0.16 | - | - | 0.17 |
| . Cadmio | | 1.53 | 1.53 | 2.10 | - | - | - |
| . Cobre | | 13 | 5.9 | 8.75 | - | 5 | 5 |
| . Niquel | | 5 | 9.04 | 8.25 | - | 8.5 | 7 |
| . Zinc | | 30 | 45 | 25.7 | - | 23 | 22 |
| . Cromo | | 2.4 | 3.76 | 2.88 | - | 1.83 | 1.38 |
| . Manganeso | | 45 | 30 | 35.0 | - | 22 | 6.80 |

(Ref. 28)

Los productos derivados del ganado al consumir éstos por ejemplo, forraje contaminado, son también degradados en su calidad, según se desprende de los análisis de leche, efectuados en el establo Veracruz del D.R.03. En el CUADRO 12 se incluyen estos análisis, donde además se tienen las concentraciones de metales pesados en el agua de abrevadero y en el forraje del que se alimenta el ganado.

CUADRO 12. METALES PESADOS EN AGUA, FORRAJE Y LECHE DEL D.R.03.

| Metal | Concentración en partes por millón en: | | |
|-------------|--|-------------------|-------|
| | Agua de abrevadero | Forraje (alfalfa) | Leche |
| . Plomo | 0.50 | 42.0 | 0.9 |
| . Mercurio | 0.0004 | - | - |
| . Cadmio | 0.30 | 3.1 | 0.6 |
| . Cobre | 0.02 | 15.0 | 1.0 |
| . Niquel | 0.14 | 6.9 | 3.2 |
| . Zinc | 0.11 | 100 | 0.8 |
| . Cromo | 0.20 | 10.5 | 2.8 |
| . Manganeso | 0.07 | 95.0 | 2.0 |

(Ref. 12).

En cuanto a organismos patógenos determinados en agua residual utilizada en el D.R.03, se han encontrado un gran número; entre los principales se tienen: Entamoeba histolytica causante de la disentería amebiana, a la Gardia lamblia, Ballantidium coli, Uncinaria y Ascaris. En suelos se han detectado quistes de amibas, huevecillos de ascaris, taenia y uncinaria. En cultivos se encontraron quistes de amibas y huevecillos de Taenia. (Ref. 10, 20, 26).

Los habitantes de la zona del D.R.03 están expuestos a contraer enfermedades infecciosas, debido a las condiciones insalubres de la región, el grado de desnutrición y a los bajos niveles de servicios de agua potable y alcantarillado. Según información de las "Estadísticas Vitales" de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, entre las principales causas de mortalidad y morbilidad se encuentran las enteritis, disentería amebiana y parasitosis; la incidencia de enfermedades entéricas para algunos municipios de ingerencia en el D.R.03 se muestra en el CUADRO 13.

CUADRO 13. MORBILIDAD POR ENTERITIS Y DIARREAS EN EL D.R.03
(ESTADO DE HIDALGO)

| Municipio | Tipo de Agua Irrigada | Morbilidad número/10,000 habitantes |
|---------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Atitalaquia | Negra | 42 |
| Tlahuelipan | Negra | 35 |
| Tlaxcoapan | Negra | 76 |
| Actopan | Mezclada | 211 |
| Fco.I. Madero | Mezclada | 96 |
| Ixmiquilpan | Mezclada | 857 |
| Progreso | Mezclada | 61 |
| San Salvador | Mezclada | 234 |
| Aldama | Mezclada | 167 |
| Tula | Blanca | 596 |

(Ref. 28).

Como se puede apreciar no existe correlación entre el tipo de agua de riego y la incidencia de enfermedades entéricas, lo cual indica que aparentemente los habitantes de la zona han adquirido resistencia y los síntomas de las en-

fermedades no son manifiestos, o bien debido a que las estadísticas a nivel de clínica sólo cubren parte de la población, la frecuencia de enfermedades no alcanza a ser detectada.

Por otra parte, los aspectos socioeconómicos, servicios de agua potable y alcantarillado, no son suministrados al total de la población, implicando condiciones higiénicas deficientes; es decir, un medio ambiente propicio para la transmisión de enfermedades a nivel personal, doméstico y mediante el agua de ingestión.

De acuerdo a mediciones de calidad del agua, en pozos y manantiales del Valle del Mezquital, Hidalgo, que se señalan en el CUADRO 15 (18) (FIGURA 4), se observan altas concentraciones de nitrógeno de nitratos que en algunos casos exceden la norma de calidad de agua potable (que acepte hasta 5 mg/l de la SSA); en el pozo de la SARH en Juando, el número de coliformes fecales por 100 mililitros sobrepasa la norma de la Organización Mundial de la Salud, la cual no admite la presencia de tales bacterias; además, en todos los pozos y manantiales, los organismos coliformes totales superan el límite normativo admisible, el cual se define por el valor de 3 organismos en 100 mililitros. Lo anterior indica que las aguas subterráneas del Valle del Mezquital se encuentran ligeramente contaminadas por nitratos y bacterias provenientes de las aguas de recarga, las cuales mejoran notablemente su calidad al infiltrarse en el suelo y subsuelo; pero por otra parte, existe la posibilidad de que los virus más pequeños que las bacterias y con períodos de sobrevivencia entre 23 y 175 días lleguen a contaminar los acuíferos y resulte riesgosa la ingestión del agua subterránea extraída. Una medida adecuada para evitar enfermedades transmitidas por el agua potable, resulta ser la desinfección mediante métodos físicos o químicos, entre los primeros se tiene el hervir el agua, entre los segundos la cloración. En la actualidad no se practica ni el control sanitario

de estos pozos, ni se aplica ningún tipo de tratamiento, como la desinfección, etc.

CUADRO 14. CALIDAD DEL AGUA DE POZOS Y MANANTIALES DEL D.R. 03

| Muestreo | Nitrógeno Amoniacal mg/l | Nitrógeno de Nitratos mg/l | Fosfatos mg/l | Detergentes mg/l | Coliformes Totales Fecales NMP/100 ml | |
|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------|--|---|
| Pozo en Apaxco | 0.085 | 0.375 | 0.016 | 0.14 | 8 | - |
| Manantial Cerro Colorado | 0.083 | 5.900 | 0.044 | 0.02 | 920 | - |
| Pozo #5 de Pemex | 0.093 | 7.200 | 0.052 | 0.07 | - | - |
| Pozo de la SARH en Juando | 0.081 | 6.300 | 0.080 | 0.08 | 1 100 | 2 |
| Manantial Tezon-tepec | 0.020 | 8.800 | 0.100 | 0.05 | 4 | - |
| Pozo Xochitlán | 0.090 | 5.800 | 0.066 | 0.05 | - | - |
| Pozo Ixmiquilpan | 0.020 | 4.500 | 0.032 | 0.04 | - | - |
| Manantial San Salvador | 0.088 | 7.400 | - | - | 4 | - |
| Pozo de la SARH en Actopan | 0.020 | 7.700 | 0.196 | 0.14 | 4 | - |

(Ref. 20).

2.3 Panorama de información internacional

En Polonia y Alemania, se tratan las aguas residuales antes de aplicarlas al suelo, aunque con tratamiento primario la mayor parte de ellos, pues se apoyan en que la práctica de utilizar efluentes de tratamiento secundario utilizando en Estados Unidos de Norteamérica, casi nunca se justifica económicamente ni bajo el punto de vista sanitario (ref. 29). En Alemania Federal se prohíbe el riego con aguas residuales de tenerías y rastros (ref. 22), y en el Este de Europa esto se extiende a los hospitales y similares. En Francia, Bulgaria, Rusia, Israel, India y Hungría, se aplican una serie de normas que restringen a ciertas condiciones y tipos de cultivo el riego con agua residual cruda. (Ref. 22).

En el CUADRO 15 se presenta un resumen con especificaciones para otros países.

En España, se efectúan experiencias de riego con aguas residuales urbanas crudas en zonas forestales. Por otra parte en amplias zonas de ese país se riegan huertos familiares o de producción periurbana, para consumo comercial. Además, a pesar de que desde hace varias décadas se riega con aguas residuales procedentes de ingenios azucareros, no se han controlado sus efectos en suelos y vegetación, pues no se han realizado estudios previos y profundos en ningún caso. (Ref. 29).

CUADRO 15. RESUMEN DE CIERTAS CARACTERISTICAS DE REGLAMENTACION EUROPEA.

| EFLUENTE | SISTEMA DE VERTIDO | TIPO DE COSECHA O ACTIVIDAD | NORMA |
|--|--|---|------------------------|
| En general | Riego por aspersión | Ninguna | Prohibido |
| | | Plantas hortícolas de consumo crudo Pastizales en época de lluvias | Prohibido Prohibido |
| | Otros métodos. | Vertido sobrepertes verdes de vegetales de consumo humano | Prohibido |
| | | Vertido sobre frutos y hortícolas durante el crecimiento. | Prohibido |
| | | Riego subsuperficial | Permitido |
| | | Plantaciones industriales y vegetales pienso | Permitido |
| Aguas residuales de hospitales | En general | Ninguna | Prohibido |
| Aguas residuales | Riego por aspersión | Ninguna | Prohibido |
| | Riegos de invierno | Ninguna | Permitidos |
| | Aplicación directa | Oleaginosas, vegetales de uso industrial, ornamentales, vegetales-pienso fuera del período vegetativo | Permitido |
| Aguas residuales que han sufrido una sedimentación | Riego por aspersión sobre vegetales de consumo animal o humano | Ninguna | Prohibido |
| | Riego por surcos | Vegetales no consumidos en crudo | Permitido |
| | Aplicación directa | Hortícolas para consumo en crudo | Prohibido |
| | Riego subsuperficial | Pastizales y hortícolas en crudo. | Prohibido |
| | | Vertido 2 semanas antes de la recolección | Permitido |

Cont. CUADRO 15.

| EFLUENTE | SISTEMA DE VERTIDO | TIPO DE COSECHA O ACTIVIDAD | NORMA |
|--|---------------------|---|-----------|
| Aguas residuales que han recibido un tratamiento biológico | Aplicación directa | Cualquier tipo de cosecha | Permitido |
| | | Fresa | Prohibido |
| | Riego por aspersion | Vertido de aguas residuales con Anthrax | Prohibido |
| | | Si hay viento fuerte | Prohibido |
| | | Proximidad de aguas de consumo | Prohibido |
| | | Frutales, patata temprana | Prohibido |
| | | Sobre hortícolas | Prohibido |

(Ref. 29).

3.0 PARAMETROS DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL: Sus efectos en suelos y cultivos y riesgos indirectos.

En este capítulo se presentan las concentraciones límites y los efectos de los principales parámetros característicos de calidad del agua que determinan su conveniencia o limitación con fines de utilización en riego agrícola.

Los contaminantes que comunmente están presentes en las aguas residuales son de origen químico y biológico; los primeros proceden principalmente de actividades industriales y se caracterizan porque muchos de estos químicos son acumulativos y con efectos crónicos que son manifestados después de largos períodos de exposición. Por otro lado su acumulación puede no representar daños al cultivo pero si al consumidor final, como por ejemplo las plantas de hojas anchas como la espinaca y lechuga, las cuales pueden acumular metales pesados en concentraciones que son tóxicas al consumidor pero no a ellas mismas. (2). Los contaminantes biológicos proceden principalmente de hospitales, rastros, fábricas de procesamiento animal, laboratorios y descargas domésticas; estos son representados por una amplia gama de microorganismos con períodos de sobrevivencia que van desde dos días hasta varios meses, lo que hace evidente la limitación del uso del agua residual y la restricción del riego con esta agua a ciertos cultivos como las hortalizas, vegetales y, en general a aquellos que se consumen crudos.

Para fines de caracterización y manejo de la calidad del agua residual en el aprovechamiento en riego agrícola se propone dividirla en:

3.1 Calidad agronómica

Se refiere a la calidad relacionada al sistema agua-suelo-cultivo y está enfocada principalmente al mayor rendimiento agrícola.

Los parámetros agronómicos constituyen una de las medidas para determinar el aprovechamiento del agua residual en riego agrícola. Estos están representados por el contenido mineral en estas aguas. En particular se utiliza la concentración de las sales solubles ya que este parámetro repercute directamente en afectación de suelos y rendimiento de cultivos.

La calidad agronómica propuesta se muestra en el CUADRO 16 en el cual se indica que dependiendo del tipo de agua residual disponible se clasifique para su uso en:

Clasificación del agua para riego:

- A Adecuada
- C Condicionada
- NR No recomendable

Los parámetros considerados en la Calidad Agronómica del agua son:

- . Potencial hidrógeno, pH
- . Contenido de sales disueltas medidas como:
 - conductividad eléctrica, CE
 - salinidad efectiva, SE
 - salinidad potencial, SP
- . Sodicidad medida como:
 - Relación de adsorción de sodio, RAS
 - Carbonato de sodio residual, CSR
 - Porcentaje de sodio posible, PSP
- . Boro, B
- . Cloruros, Cl⁻

CUADRO 16. CLASIFICACION DEL AGUA RESIDUAL PARA RIEGO AGRICOLA

| Tipo de Agua | Clasificación | Características |
|--|---------------------|---|
| Agua de primer uso (Agua blanca) | A. Adecuada | - Su aplicación agrícola no presenta ningún riesgo aún en las condiciones más adversas de suelos, cultivos o climas. |
| Agua mezclada (Agua residual+Agua blanca) | | |
| Agua Residual | C. Condicionada | - Cuando su aplicación puede causar afectación si no son cumplidas ciertas condiciones de suelos y selección de cultivos. - Cuando por su calidad, aún con adecuada selección de cultivos y climas su aplicación puede causar problemas de afectación de suelos sino son aplicadas ciertas prácticas. (lavado, mejoradores). |
| Agua Residual | NR. No Recomendable | - Cuando se tienen sustancias tóxicas en exceso y es necesario el tratamiento. |

(Ref. 28).

3.1.1 Características y efectos de los parámetros considerados en la calidad agronómica de las aguas residuales.

Potencial hidrógeno, pH

Debido a que la mayoría de los efectos de la acidez y alcalinidad en el agua de riego sobre los suelos y el crecimiento de los cultivos son indirectos, no se recomiendan valores específicos de pH; sin embargo, el agua con valores de pH en el rango de 4.5 a 9.0 podrá ser aprovechada siempre y cuando se considere el desarrollo de efectos indirectos perjudiciales por las condiciones químicas particulares del suelo. (27).

Salinidad

Los parámetros generalmente utilizados para estimar la salinidad o el conte-

nido de sales solubles en el agua son: la conductividad eléctrica (CE), la salinidad efectiva (SE) y la salinidad potencial (SP). De estas tres medidas la más comúnmente utilizada es la conductividad eléctrica, debido a su facilidad de determinación.

La conductividad eléctrica, es el inverso de la resistencia en ohms de un conductor metálico o electrolítico, que tiene un cm de largo y un área transversal de un cm²; se expresa en unidades de ohms por centímetro, siendo además una medida indirecta del contenido de sales disueltas en el agua.

Mediante la relación de sólidos disueltos y conductividad eléctrica se ha determinado una calidad del uso del agua en riego agrícola (ref. 30), dicha calidad se presenta en el CUADRO 17.

CUADRO 17. CLASIFICACION DE AGUAS DE RIEGO POR CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.

| Designación | Sólidos totales disueltos (mg/l) | Conductividad Eléctrica (milimhos/cm) |
|--|----------------------------------|---------------------------------------|
| Agua que no ocasiona efectos notables perjudiciales. | 5 - 500 | 0.75 |
| Agua que puede ser perjudicial en cultivos sensibles. | 500 - 1000 | 0.75 - 1.50 |
| Agua que puede tener efectos adversos sobre varias cosechas y que requiere cuidado en la práctica de manejo del suelo. | 1000 - 2000 | 1.50 - 3.00 |
| Agua que puede ser usada para plantas tolerantes a las sales con cuidadosas prácticas de manejo y sobre suelos permeables. | 2000 - 5000 | 3.0 - 7.50 |

(Ref. 30).

La salinidad efectiva y la salinidad potencial que determinan una estimación

más real de las sales solubles se basan en el cálculo de balances de iones y cationes; en el primer caso de carbonatos, bicarbonatos y sulfatos de calcio y magnesio, sales poco solubles, y en el segundo caso de una correlación de cloruros y sulfatos que son las últimas sales que quedan en solución.

La calidad de las aguas de riego de acuerdo a su salinidad efectiva y potencial se indican en el CUADRO 18.

CUADRO 18. CALIDAD DE AGUA DE RIEGO DE ACUERDO A LA SALINIDAD EFECTIVA Y SALINIDAD POTENCIAL.

| Criterio | Parámetros | Calidad del Agua | | |
|--------------------|------------------------------------|------------------|--------------|-----------------|
| | | Buena | Condicionada | No recomendable |
| Contenido de Sales | Conductividad Eléctrica (mhos/cm) | 750 | 750 a 2000 | 2000 |
| | Salinidad Efectiva (me/l) | 3.0 | 3 a 15 | 15 |
| | Salinidad Potencial (me/l) | 3 | 3 a 15 | 15 |

(Ref. 30).

Efectos de la salinidad en suelos y cultivos

Con respecto a la salinidad se ha obtenido (ref.7) que el rendimiento de tomate crudo en parcelas salinizadas artificialmente fue reducido en un 10% por cada aumento de 1.5 milimhos/cm a partir de 2.0 milimhos/cm en la conductividad eléctrica del suelo. Esta reducción en rendimiento se atribuye a la disminución en la absorción del agua debida al incremento en la salinidad del suelo. En el CUADRO 19 se presenta la correlación entre el porcentaje de disminución de rendimiento del cultivo y la salinidad expresada como conductividad eléctrica.

CUADRO 19. DISMINUCION DEL RENDIMIENTO DE ALGUNOS CULTIVOS EN FUNCION DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DEL AGUA DE RIEGO.

| CULTIVOS COMUNES | PORCIENTO DE DISMINUCION DEL RENDIMIENTO | | |
|---------------------|--|-------------|-------------|
| | 10 | 25 | 50 |
| Cebada | 12 mmhos/cm | 16 mmhos/cm | 18 mmhos/cm |
| Remolacha azucarera | 10.0 | 11.0 | 16.0 |
| Algodonero | 10.0 | 12.0 | 16.0 |
| Centeno | 8.0 | --- | 10.0 |
| Cártamo | 7.0 | 11.0 | 14.0 |
| Trigo | 7.0 | 10.0 | 14.0 |
| Sorgo | 6.0 | 9.0 | 12.0 |
| Soya | 5.0 | 7.0 | 9.0 |
| Arroz | 5.0 | 6.0 | 8.0 |
| Maíz | 5.0 | 6.0 | 7.0 |
| Avena | 4.0 | 8.0 | 10.0 |
| Sesbania | 4.0 | 6.0 | 9.0 |
| Haba | 4.0 | 5.0 | 7.0 |
| Linaza | 3.0 | 5.0 | 7.0 |
| Frijol | 1.0 | 2.0 | 3.0 |
| CULTIVOS FORRAJEROS | | | |
| Pimpinela | 2.0 | 2.5 | 4.0 |
| Trebol Ladino | 2.0 | 2.5 | 2.5 |

(Ref. 30)

Sodio

Los efectos del sodio sobre la permeabilidad son medidos mediante la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), definida por el cociente cuyo numerador es el valor de la concentración de sodio y el denominador la raíz cuadrada de la suma de los valores de las concentraciones de calcio y magnesio.

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}}$$

Se considera que valores de RAS menores de 10 son satisfactorios, entre 10 y 18 marginales y mayores de 18 dañinos. (Ref. 21).

Otras medidas para estimar el efecto probable del sodio contenido en el agua sobre las características físicas del suelo son, el carbonato de sodio residual (CSR) y el porcentaje de sodio posible (PSP). (Ref. 2,3,26).

Las concentraciones altas de sodio en comparación con el calcio y magnesio, reducen la permeabilidad del suelo obstruyendo el acceso del agua a las raíces, lo que se refleja en la disminución del crecimiento del cultivo.

Boro

En general en los cultivos sensibles se presenta toxicidad a concentraciones de boro de 1 mg/l o menos; los cultivos semitolerantes de 1 a 2 mg/l y los cultivos tolerantes de 2 a 4 mg/l. A concentraciones mayores de 4 mg/l el agua de riego generalmente daña a la mayoría de los cultivos. CUADRO 20.

CUADRO 20. CLASIFICACION DE AGUAS DE RIEGO POR CONTENIDO DE BORO (mg/l).

| Clasificación del agua de riego | C U L T I V O S | | |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------|------------|
| | Sensibles | Semitolerantes | Tolerantes |
| | (Concentración de Boro en mg/l) | | |
| Excelente | 0.33 | 0.67 | 1.00 |
| Buena | 0.33-0.67 | 0.67-1.33 | 1.00-2.00 |
| Permisible | 0.67-1.00 | 1.33-2.00 | 2.00-3.00 |
| Dudosa | 1.00-1.25 | 2.00-2.50 | 3.00-3.75 |
| Inadecuada | 1.25 | 2.5 | 3.75 |

(Ref. 12).

Efectos del boro en suelos y cultivos

En algunos países (ref. 4,7,35), se han registrado toxicidades de boro en plantas en las cuales el problema está más relacionado con el uso de aguas de irrigación con concentraciones altas de boro, que en suelos con altos contenidos de este elemento; sin embargo, los boratos solubles tienden a acumular-

se a otras sales solubles en suelos de regiones áridas, ocasionando un desarrollo anormal de las plantas.

En cultivos de alfalfa (5) se indica que un contenido normal de boro en sus tejidos es del orden de 50 ppm, mientras que cantidades menores de 20 ppm son deficientes y cantidades mayores de 250 ppm causan toxicidad.

Cloruros

Las concentraciones permisibles de cloruros dependen del cultivo, de las condiciones ambientales y de las prácticas de riego. En el CUADRO 21 se muestran las concentraciones de cloruros en el agua de riego que se han sugerido. (20).

CUADRO 21. CLASIFICACION DE AGUAS DE RIEGO SEGUN EL CONTENIDO DE CLORUROS

| Clase | Contenido de cloruros (meq/l) |
|-----------------|-------------------------------|
| Buena | Menos de 1.0 |
| Condicionada | De 1.0 a 5.0 |
| No recomendable | Más de 5.0 |

(Ref. 20).

Los cloruros en el agua de riego no son generalmente tóxicos a los cultivos, sin embargo ciertos frutos son sensibles a ellos.

El resumen de los principales parámetros agronómicos y sus efectos se presenta en el CUADRO 22.

CUADRO 22. RESUMEN DE LOS EFECTOS EN CULTIVOS Y SUELOS DE ALGUNOS PARAMETROS DE LAS AGUAS RESIDUALES CONSIDERADOS EN CALIDAD AGRONOMICA.

| PARAMETRO Y RANGO DE CONCENTRACION EN AGUA DE RIEGO | | EFFECTOS EN SUELOS Y CULTIVOS |
|---|---------------------------------------|---|
| pH: (Potencial de hidrógeno) | 4.8 | Aplicada en suelos ácidos solubiliza el fierro, aluminio y manganeso a concentraciones tóxicas a las plantas. |
| | 8.3 | Altamente alcalinas, pueden contener altas concentraciones de sodio, carbonatos y bicarbonatos. |
| Salinidad | mohs/cm | Las adiciones salinas a suelos ácidos disminuyen el pH de éstos e incrementan la solubilidad del aluminio. |
| CE: (Conductividad eléctrica) | 750 | No ocasiona efectos perjudiciales |
| | 750-1500 | Perjudica a cultivos sensibles |
| | 1500-3000 | Apta para cultivos semitolerantes |
| | 3000-7500 | Apta para cultivos tolerantes y suelos permeables. |
| B: (Boro) | 1 | Apta para el riego de cultivos sensibles |
| | 1-2 | Apta para cultivos semitolerantes |
| | 2-4 | Apta para el riego de cultivos tolerantes; tóxico a determinados cultivos sobre todo a frutales que son sensibles al Boro. |
| Cl ⁻ : (Cloruros) | 3.0 meq/l | Cuando se riega por aspersión existe absorción foliar que afecta a cítricos y frutales. Afecta cítricos, frutas y almendras. |
| | 1.0 | Aceptable para el riego |
| | 1.0-5.0 | Condicionada |
| | 5.0 | No recomendable |
| | RAS: (Relación de Absorción de Sodio) | 10 |
| | 10-18 | Condicionada |
| | 18 | No recomendable. El sodio altera la permeabilidad del suelo. |

(Ref. 21,26,30,53,59).

3.2 Calidad sanitaria

La calidad sanitaria se refiere a aquella que tiene relación con la afectación a la salud pública y el medio ambiente. Se consideran como principales parámetros de afectación los microorganismos patógenos y las sustancias tóxicas. Estos parámetros junto con otras características como naturaleza del suelo y tipo de cultivo delimitan o condicionan en su caso la aplicación de este tipo de riego.

3.2.1 Contaminación biológica

Los principales aportadores de microorganismos patógenos son las descargas domésticas, así como las descargas de hospitales, sanatorios, centros de salud, rastros y tenerías. Esta contaminación provoca una serie de daños representados principalmente por la contaminación biológica de los productos irrigados con agua residual, la contaminación de acuíferos y los problemas de salud debidos a los agentes infecciosos como bacterias causantes de diversas enfermedades de origen hídrico: disentería amibiana y bacilar, cólera, fiebre tifoidea y paratifoidea, gastroenteritis e infecciones provocadas por helmintos, protozoarios y virus, incluyendo el causante de la poliomielitis.

Debido a la gran diversidad de microorganismos en el agua entre patógenos y no patógenos, se tiene gran dificultad en el monitoreo de los microorganismos responsables de las enfermedades hídricas presentes en agua residual, así como también el obtener la correlación que existe en la afectación, propagación y riesgo epidemiológico, se ha tomado como indicador biológico a las bacterias entéricas coliformes que proceden de las excreciones humanas. La densidad de población de estos microorganismos en el agua residual depende en gran medida de la cantidad y calidad del sustrato disponible que es la

materia orgánica, la cual depende del número de población, localización geográfica de la comunidad, estación del año y hábitos alimenticios.

Es importante aclarar que cuando se sospecha peligros epidemiológicos es im prescindible incluir el monitoreo de otros patógenos, así como de virus.

3.2.2 Agentes biológicos en cultivos y suelos.

Debido a la desecación y a la exposición a la luz del sol, los quistes de helminetos depositados sobre las superficies de las plantas mueren rápidamente. Se ha encontrado que los quistes de ascaris, rociados sobre tomate y lechuga son completamente degradados después de un período que va de 27 a 35 días. Debido al crecimiento de los cultivos, a la presencia de gente en los sitios de irrigación y a la longevidad de los cigotos de helmintos, es aconsejable aplicar tratamiento primario al agua, antes del riego. (Ref. 31,32).

Los microorganismos presentes en el agua residual y que se depositan en los cultivos mediante el riego, muestran tiempos de sobrevivencia que van desde 3 días, como es el caso de la Endamoeba histolytica, hasta 3 meses como el caso de la Shigela, ambas producen enfermedades gastrointestinales. Los períodos más comunes se presentan en el CUADRO 23.

CUADRO 23. TIEMPOS DE SOBREVIVENCIA DE ORGANISMOS PATOGENOS EN DISTINTOS MEDIOS.

| ORGANISMO | MEDIO | TIEMPO DE SOBREVIVENCIA |
|------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Antrax bacteria | En agua y agua residual | 19 días |
| Huevos de Ascaris | Sobre vegetales | 27-35 días |
| | Sobre suelos irrigados | 2 a 3 días |
| | Dentro de suelos | 6 años |
| B. dysenteriae flexner | En agua que contiene humus | 160 días |
| | Dentro del agua | 7-30 días |
| B. typhosa | Dentro del suelo | 29-58 días |

| ORGANISMO | MEDIO | TIEMPO DE SOBREVIVENCIA | |
|-------------------------------|---|--------------------------------|-------------|
| Coliformes | Dentro del suelo | 60-70 días | |
| | Sobre vegetales | 31 días | |
| | Sobre pasto | 14 días | |
| | Sobre hojas de clavo | 12-14 días | |
| | Sobre clavo a 40-60% de humedad | 6 días | |
| | Sobre vegetales (tomates) | 35 días | |
| | Sobre la superficie del suelo a 17°C | 38 días 46-73 días | |
| | Endamoeba histolytica | Sobre vegetales | 3 días |
| En el agua | | meses | |
| En el agua de río | | 8 días | |
| Leptospira | En el agua residual | 30 días | |
| | En el agua de drenaje | 32 días | |
| | | | |
| Quistes de lombriz intestinal | Dentro de hierba casi seca | por encima de un año | |
| | Dentro de agua contaminada a 20°C | 20 días | |
| Poliovirus | Sobre pasto (aguas residuales crudas) | 6 semanas | |
| Salmonella | Sobre clavo (cosechado con agua usada) | 12 días | |
| | Sobre vegetales | 4 semanas | |
| | Sobre vegetales | 7 días | |
| | Sobre vegetales | 40 días | |
| | Sobre betabel | 3 semanas | |
| | Sobre la superficie de suelos y papas | 40 días | |
| | Sobre zanahorias | 10 días | |
| | Sobre col y arbustos (grosella) | 5 días | |
| | Dentro de suelos arenosos esterilizados | 24 semanas | |
| | Dentro de suelos arenosos no esterilizados | 5-12 semanas | |
| | Sobre la superficie de suelos (regados con aguas residuales crudas) | 46 días | |
| | Dentro de los primeros estratos del suelo | 70 días | |
| | Sobre la superficie de suelos (depósito de agua residual) | 15-23 días | |
| | Quistes de Schistosoma | Dentro de tanques de digestión | 3 meses |
| | | Dentro de tanques sépticos | 2-3 semanas |
| Shigella | Sobre pasto (agua residual cruda) | 6 semanas | |
| | Sobre vegetales | 7 días | |

| ORGANISMO | MEDIO | TIEMPO DE SOBREVIVENCIA |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Streptococos | Dentro de suelos | 35-63 días |
| | Sobre la superficie de suelos | 38 días |
| Salmonella typhi | En agua que contiene humus | 87-104 días |
| Mycobacterium tuberculosiso | Sobre pasto | 10-14 días |
| | Dentro del suelo | 6 meses |
| Salmonella typhosa | En el agua | 1-3 meses |
| | Dentro de arenas | 7-17 días |
| Vibrio comma | Dentro de estiércol | 40 días |
| | En agua de río | 32 días |
| | En agua usada | 5 días |

(Ref. 2).

En México (31) se ha establecido un límite de 1000 coliformes/100 ml para aguas residuales que se destinan a riego.

3.2.3 Sustancias tóxicas

Sustancias tensoactivas (detergentes)

Uno de los problemas que se cuestiona en primer término en el riego con aguas residuales, es el efecto que produce la presencia de detergentes en cultivos, ya que es palpable la alta espumación que se produce en los canales de riego, como por ejemplo en el D.R. 03.

Se han realizado estudios experimentales en los siguientes cultivos: alfalfa, avena, cebada, frijol, jitomate, lechuga y zanahoria, los cuales se han regado con agua de riego con concentraciones de 10, 30, 50 y 70 mg/l de ABS (Sulfonato de alquibenceno) sin encontrar efecto negativo en las plantas para ningún nivel de ABS probado. Entre los efectos benéficos se observó que el ABS abate la tensión superficial de la solución del suelo ocasionando mayor absorción de agua por las plantas; además, en lechuga hubo incrementos de un 30% en rendimiento debido a las aplicaciones de 70 ppm de ABS. Por otra

parte (5) se ha observado toxicidad en frijol y lechuga cuando el suelo con tenía 40 y 60 ppm de ABS, respectivamente, en cambio a concentración de 20 ppm se estimuló el crecimiento.

3.2.3.1 Efectos de metales pesados en suelos y cultivos

Las aportaciones de metales pesados en aguas residuales se deben principalmente a descargas industriales.

Los principales efectos de los metales pesados, tales como Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Aluminio (Al), Arsénico (As) y Cromo (Cr), se manifiestan después de largos períodos de riego, dependiendo su mayor o menor acentuación, del tipo de suelo y cultivo.

Los estudios realizados y publicados no concuerdan en que la concentración de los metales pesados, en todos los casos, se magnifique a través de la cadena alimenticia, pero si ha quedado dilucidado el efecto acumulativo y el daño potencial a la salud humana que la presencia de estos metales pesados representa. (Ref. 40).

De acuerdo con las normas de calidad para agua de irrigación que se utiliza en forma continua, en todo tipo de suelos, las concentraciones recomendables de plomo, cadmio y cromo son 5, 0.010 y 0.10 mg/l, respectivamente. (Ref.33). Para suelos de textura fina o para uso esporádico del agua residual se pueden tolerar valores mayores, esto se puede observar en el CUADRO 24 donde se presentan las concentraciones máximas recomendables de metales pesados presentes en agua para riego.

CUADRO 24. CONCENTRACIONES MAXIMAS PERMISIBLES DE METALES PESADOS EN AGUAS PARA RIEGO.

| Elemento | Para agua usada continuamente en todo tipo de suelo (mg/l) | Para agua usada en suelo de textura fina (mg/T) | Uso esporádico (mg/l) |
|----------------|--|---|-----------------------|
| Aluminio (Al) | 1.0 | - | 20.0 |
| Arsénico (As) | 1.0 | 10.0 | 10.0 |
| Berilio (Be) | 0.5 | 1.0 | 1.0 |
| Cadmio (Cd) | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| Cromo (Cr) | 5.0 | 20.0 | 20.0 |
| Cobalto (Co) | 0.2 | 10.0 | 10.0 |
| Cobre (Cu) | 0.2 | 5.0 | 5.0 |
| Plomo (Pb) | 5.0 | 20.0 | 20.0 |
| Manganeso (Mg) | 2.0 | - | 20.0 |
| Molibdeno (Mb) | 0.005 | 0.05 | 0.05 |
| Niquel (Ni) | 0.5 | 2.0 | 2.0 |
| Selenio (Se) | 0.05 | - | 0.05 |
| Zinc (Zn) | 5.0 | 10.0 | 10.0 |

(Ref. 35).

Efectos registrados por el contenido de Cadmio, Arsénico, Cromo, Mercurio, Aluminio y Plomo.

Cadmio

Se ha investigado la acumulación de cadmio por las plantas, obteniéndose que la mayor acumulación se presentaba en suelos ácidos. Acondicionando el suelo mediante encalado se incrementa el pH de 5.9 a 7.2 obteniéndose mediante esta práctica que se inhibe la absorción de cadmio por las plantas.

Se ha analizado el cadmio en un gran número de cultivos obteniéndose niveles entre 0.01 y 0.45 ppm (5).

A concentraciones de 0.2 mg/l de cadmio se obtuvieron reducciones de un 50% en el rendimiento de frijol, así como en lechuga y maíz con 1 mg/l, en tomate y centeno con 5 mg/l y en calabaza con 9 mg/l; además, se comprobó que la concentración en las hojas aumentaba conforme se incrementaba el cadmio en

el agua de riego. (Ref. 7).

El cadmio en una concentración de 0.10 mg/l produce una reducción en el rendimiento de la col, la cebada, frijol, remolacha y nabo del orden de 20% (ref. 22).

En el reglamento vigente en México los valores máximos permisibles de concentración de cadmio en agua residual para uso en riego son de 0.005 mg/l, siendo el mismo que el límite en Estados Unidos. Sin embargo, en este país, para su aplicación en suelos de textura fina, se permite un máximo de 0.05 mg/l. (Ref. 35).

Arsénico

Las concentraciones muy bajas de arsenatos (ref.36) estimulan el crecimiento de las plantas; la presencia excesiva de arsénico soluble en el agua de riego reduce el rendimiento de los cultivos. El principal efecto es la destrucción de clorofila en el follaje. (Ref. 36).

Suponiendo que el arsénico se mezcla en una profundidad del suelo de 15 cm, y que se encuentra en forma de arsenato, las cantidades que producen toxicidad en plantas sensibles varía de 112 kg/ha para suelos arenosos a 336 kg/ha para suelos arcillosos (ref. 37).

Se ha encontrado que los alimentos procesados de plantas, rara vez contienen más de 1 ppm de As (ref. 7) y no se ha demostrado que sea esencial para plantas y animales. Las aplicaciones de arsénico como arseniatos para el combate de plagas (ref.41) incrementa el nivel de arsénico desde 0.02 hasta 0.57 ppm en los cultivos tales como maíz, papa y frijol. Por otra parte (ref.7) se plantea que las cantidades de arsénico absorbidas por las plantas son insignifican

tes (0.5 ppm) aún en suelos en los que se aplica continuamente; pero el riego por aspersión puede elevar los niveles arsenicales arriba de 0.5 ppm. En Estados Unidos el contenido de arsénico de frutas y vegetales es de 1.4 ppm. En México (ref.33) el valor máximo permisible de arsénico en agua de riego es de 5 mg/l, mientras que en Estados Unidos es de 1 mg/l, para riego continuo y 20 ppm para suelo de textura fina.

Cromo

El cromo se ha encontrado tóxico a las plantas a concentraciones de 5 mg/l produciendo clorosis (decoloración de las hojas de los cultivos). El cromo está presente en cantidades de rastros, en las hojas de las plantas pero no hay evidencia de que sea esencial o benéfico para su nutrición. (Ref. 22).

Se ha publicado el efecto estimulante de los cromatos sobre el crecimiento de los cultivos, así como de sus efectos tóxicos (ref. 38). En tejidos vegetales normales se encontraron de 0.01 a 1.0 ppm y el nivel medio entre 0.1 y 0.5 ppm. En análisis practicados en pastura y paja de avena se ha encontrado menos de 0.1 y 0.2 ppm de cromo, respectivamente. También se ha encontrado que los efectos tóxicos de cromo se asocian con un contenido reducido de nitrógeno en plantas de avena. (Ref. 7).

Mercurio

En la India, se tienen informes (ref. 7) de una epidemia por envenenamiento con granos de centeno y trigo contaminados con metil mercurio; las concentraciones detectadas fueron de 0.2 a 12 ppm. Sin embargo, los granos menos contaminados usualmente contenían concentraciones menores de 0.02 ppm.

En Japón (ref. 42) se recolectaron muestras de suelo de siete huertos en los

se cultivan naranjas y manzanas que recibieron aspersiones de fungicidas mercuriales durante siete años, encontrándose que la mayor cantidad de mercurio quedaba retenida en la capa superficial. El contenido de mercurio varió de 0 a 2.2 ppm en los suelos.

Aluminio

Para un gran número de cultivos se ha registrado toxicidad a concentraciones de aluminio de 1 mg/l. En el trigo y el naranjo la concentración que reduce el crecimiento es de 0.1 mg/l. A valores de pH entre 5.5 y 8.0 los suelos tienen gran capacidad para precipitar el aluminio soluble y eliminar su toxicidad. También ésta se puede eliminar con encalados hasta lograr un pH en el suelo mayor de 5.5; a un pH de 4.3 se observó toxicidad que se manifestó en desarrollo anormal de las raíces de algunos cultivos.

En Estados Unidos para riego continuo se permite una concentración en agua residual de 1.0 ppm, y para suelos de textura fina hasta 20 pp,.

Plomo

La concentración de plomo en los cultivos se ha asociado principalmente a la cercanía de éstos a las carreteras, al arrastre en la atmósfera por la lluvia, que después es llevado por el drenaje, en el caso de riego con aguas negras.

Por ejemplo, pastos que crecían a un metro de la carretera (ref.7) contenían 975 ppm de plomo y los suelos 130 ppm; a 25 metros se detectaron 577 y 80 ppm en pastos y suelos, respectivamente; y a 50 m tenían de 160 a 171 los pastos y de 10 a 65 ppm los suelos. Las concentraciones de plomo presentes en los cultivos dependen de la distancia que existe a la carretera, de la densidad de

tráfico, de la dirección del viento y de la vegetación existente. Se han publicado (ref. 43) las concentraciones para diferentes cultivos por ejemplo: en 76 muestras de frutos entre 0.1 y 3.90 ppm, en pastos 1.61 ppm y en manzanas 6.39 ppm.

En viñedos (ref.7) expuestos a las emisiones de automóviles en Italia se encontraron concentraciones de 4 a 6 ppm de plomo en las uvas, siendo mínima la concentración a una distancia de 100 y 120 metros de la carretera (ref. 42).

La fitotoxicidad del plomo es relativamente baja. Se ha encontrado que una concentración de nitrato de plomo de 25 mg/l causó toxicidad a las plantas de tomate y avena. Mientras que el plomo soluble contenido en suelos sea usualmente de 0.05 a 5.0 mg/kg se puede esperar poca toxicidad. Esto demuestra que la presencia del plomo en las plantas es más atribuible a la precipitación del plomo atmosférico por las lluvias que a la absorción de plomo en los suelos. El nitrato de plomo en concentraciones de 1.5 a 25 mg/l tuvo un efecto estimulante en cultivos de avena y papa, pero en concentraciones de más de 50 mg/l todas las plantas murieron en el lapso de una semana (ref. 45). Se ha encontrado que los metales pesados se acumulan en diferentes partes de los cultivos a diferentes proporciones; las frutas tienen un contenido menor de cadmio y plomo que los vegetales frondosos. (Ref. 46).

La legislación mexicana establece que el límite máximo permisible de plomo en aguas de uso continuo en riego es de 5.0 mg/l y en aguas de uso limitado a suelos de textura fina se toleran hasta 20 mg/l. (Ref. 33).

El resumen de efectos en cultivos y suelos de los principales parámetros se presenta en el CUADRO 25.

CUADRO 25. RESUMEN DE EFECTOS EN CULTIVOS Y SUELOS DE ALGUNOS PARAMETROS CONSIDERADOS EN LA CALIDAD SANITARIA DE LAS AGUAS RESIDUALES.

| PARAMETRO | EFECTO |
|--------------------|--|
| Detergentes | No se han manifestado efectos dañinos en alfalfa, avena, cebada, jitomate, lechuga y zanahoria a concentraciones en agua residual de 70 mg/l. |
| Fenol | No es dañino a los cultivos, representa riesgos de contaminación por su lenta biodegradación. |
| Mercurio | Se retiene la mayor parte en la capa superficial del cultivo; presenta riesgo por ser acumulativo en la cadena alimenticia. |
| Arsénico | Es 3 veces menos tóxico en suelos arenosos que en suelos arcillosos. Reduce el crecimiento de raíces y tallos y disminuye la productividad de algunas legumbres. Destriega la clorofila del follaje. |
| Cromo | Inhibe la nitrificación en suelos a concentraciones de 1.0 mg/kg. Concentraciones de 8 mg/l de cromo producen clorosis sobre la remolacha, maíz, centeno, calabaza desarrollada en suelos arenosos. Reduce el crecimiento. |
| Cadmio | Elemento acumulativo y altamente tóxico; su presencia constituye un riesgo en la alimentación humana. En concentraciones de 0.1 mg/l reduce rendimientos en un 25% en frijol, remolacha y nabo; y de 20 a 50% en col y cebada en 20-50%. |
| Aluminio | Vuelve improductivos a los suelos ácidos. A pH entre 5.5 y 8.0 se precipita en suelos y se reduce su toxicidad. Reduce el crecimiento de algunos frutales. |
| Plomo | Es un elemento acumulativo en la cadena alimenticia por lo que es un riesgo en la alimentación humana. El mayor aporte se debe al plomo atmosférico precipitado por lluvias. |
| Agentes biológicos | Las altas concentraciones de coliformes totales en agua residual (10^8 org/100 ml), hacen prohibitivo el riego de cultivos que se consumen crudos. |

Observaciones: En los análisis de suelos de Werribee Australia a los que se aplicó agua residual cruda para el riego, se encontró un incremento del zinc, cobre, cadmio, cromo, cobalto y plomo en una capa superior de 2.5 cm del suelo, dichos incrementos fueron aproximadamente equivalentes a las concentraciones de estos metales en agua residual aplicada (ref. 4).

3.3 Riesgos a la salud de los animales que se sometan a pastoreo en forrajes regados con agua residual.

Riego de pastizales

Los riesgos a la salud de animales y potencialmente en el hombre asociado con el pastoreo del ganado sobre forrajes regados con aguas residuales han sido estudiados por diversos autores. Greenberg y Kupka (ref.47) en su revisión de la transmisión de tuberculosis por el agua residual señalan que los desechos de instituciones u hospitales que tratan con pacientes tuberculosos, y las aguas residuales procedentes de granjas y rastros que manejan animales tuberculosos casi siempre contendrán un gran número de bacilos tuberculosos. Greenberg y Dean (ref. 48) señalan que el ganado que pasta en tierras regadas con aguas residuales muestran frecuentemente un incremento de infestaciones en la carne debidas a quistes de *Cysticercus bovis*, los cuales infestan al hombre al consumir la carne y se desarrolla el parásito al estado adulto llamado *Taenia saginata*. Esta enfermedad está ampliamente distribuida en los animales y en el hombre y está considerada como un serio problema de salud pública en muchas áreas del mundo.

McKendrick (ref. 49) registró que los pastos regados con efluente secundario en Rodesia, eran incubadores ideales para una variedad de plagas y enfermedades. La hinchazón y los parásitos intestinales se convirtieron en problemas severos para el ganado que se alimentó de estos pastos y se necesitaron extensos programas de salud incluyendo dosis orales y vacunas para protegerlos contra los parásitos intestinales y otras enfermedades.

En un proyecto similar (ref. 50) en Werribee, Australia, el agua residual tratada por un proceso de sedimentación se aplica a los pastos. La tierra se riega por uno o dos días, después se deja secar de 5 a 8 días y solo en

tonces se permite que el ganado y las ovejas entren a pastar. McPherson registra que el ganado prospera en esta situación y que requiere el mismo cuidado que el ganado de ranchos convencionales. La carne de estos animales requiere de una rígida inspección.

3.3.1 Tratamiento y medidas recomendables

Los informes indican que el tratamiento convencional de las aguas residuales es inadecuado para eliminar completamente los quistes de *Taenia saginata* presentes en ellas. El bacilo de la tuberculosis no es removido por tratamiento biológico convencional, pero si lo es después de una fuerte cloración (ref. 4).

Algunos reglamentos para el riego con aguas residuales de tierras para pastar han recomendado permitir el pastoreo del ganado después de que los campos estén completamente secos. La eficiencia de este procedimiento es dudosa ya que los descubrimientos de Jepson y Roth (ref. 51) mostraron que los quistes de *Taenia saginata* pueden permanecer activos bajo condiciones naturales por meses, lo que representa un tiempo suficientemente largo para permitir la contaminación de los campos y de los cultivos, aunque esta medida es recomendable ya que disminuye el riesgo notablemente y se complementa con una inspección rigurosa de la carne.

3.3.2 Dispersión de microorganismos en aerosoles

Otro problema ocasionado por el riego con aguas residuales es la posible inhalación de microorganismos patógenos contenidos en las aguas residuales en zonas donde se riega por aspersión.

En Jerusalem se han iniciado estudios para evaluar este problema. Katzenelson y Teltche, (ref. 52), en estudios preliminares han podido recoger bacterias enté

ricas incluyendo Salmonella a distancias de 100 a 350 m de un campo rociado con un efluente no desinfectado. El tamaño de las partículas viables en aerosol fueron determinadas con un muestreador del tipo Anderson Cascade y los resultados indican que un porcentaje significativo de las bacterias recogidas son asociadas con partículas con rango de $1-4\mu$ m las cuales pueden ser inhaladas y pueden considerarse potencialmente infecciosas.

La proporción de desaparición y reducción en las concentraciones de patógenos incorporados a los aerosoles es función de la velocidad del viento, la temperatura, la humedad relativa y las condiciones topográficas.

En el CUADRO 26 se muestran las concentraciones de enterovirus en aerosoles a diferentes distancias.

CUADRO 26. CONCENTRACION DE ENTEROVIRUS EN AEROSOLES RESULTANTES DEL RIEGO POR ASPERSION CON AGUAS RESIDUALES: COLONIAS POR METRO CUBICO.

| SITIO | DISTANCIA (m) | CONCENTRACION DE COLIFORMES TOTALES EN EL AGUA RESIDUAL EN NMP POR LITRO | CONCENTRACION DE ENTEROVIRUS EN AEROSOLES EN COLONIAS POR M3 () VALOR PROM. |
|---|---------------|--|--|
| Pleasanton, California (Efluente Secundario) | 50 | $6.1 \times 10^5 - 1.9 \times 10^6$ | 0.011 - 0.017 (0.014) |
| Kibbutz Tzora, Israel (Efluente de Laguna de oxidación) | 36-42 | $3.1 \times 10^7 - 1.5 \times 10^9$ | 0 - 0.082 (0.015) |
| | 50 | 1.0×10^8 | 0.14 |
| | 70 | $1.0 \times 10^7 - 1.7 \times 10^8$ | 0 - 0.026 (0.013) |
| | 100 | $2.4 \times 10^7 - 3.0 \times 10^8$ | 0 - 0.010 (0.038) |

(Ref. 52).

3.4 Características de las aguas residuales municipales en el país.

En los puntos anteriores se han mostrado las características y efectos de los principales contaminantes químicos y biológicos que comúnmente están presentes en aguas residuales por lo que es conveniente conocer las características promedio de las aguas residuales de población mayores de 10, 000 hab. en la República Mexicana.

Como ya es conocido la variación en las características de calidad de las aguas residuales generadas por distintas ciudades, se debe principalmente al tipo de agua abastecida, influencia industrial, tamaño de población, clima prevaleciente y desde luego por el estilo de vida.

En el CUADRO 25 se presentan los resultados de acuerdo a un análisis estadístico de la mayoría de los datos publicados sobre las características de las aguas residuales de ciudades mexicanas mayores de 10 000 hab. Se ha estimado la media de los principales parámetros indicadores de la calidad del agua residual así como su intervalo de confianza donde se espera que la mayoría de los valores reales se encuentren (ref. 39).

En este cuadro se aprecia que los monitoreos ordinarios de aguas residuales procedentes de centros urbanos no incluyen metales pesados por lo que en cada caso particular es recomendable inferirlos mediante datos de monitoreo de agua de abastecimiento, así como el tipo de industria establecido y el volumen de aguas residuales descargadas.

En donde no se define el rango significa que se presentan condiciones que son muy particulares de cada población o que no se dispone de suficiente información confiable.

Por otra parte las concentraciones referidas en el CUADRO 25 son representativas de aguas residuales porque, aunque si existen descargas industriales las predominantes son las descargas de aguas residuales domésticas.

La concentración media de DBO_5 es ligeramente mayor a la publicada en Estados Unidos de Norteamérica esto puede atribuirse al mayor consumo percapita de este país.

En este cuadro se observa que la relación de DBO_5 y la DQO va de 0.45 a 0.50 en los límites inferior y superior, lo que la situa dentro de las aguas residuales típicas (relación de DBO_5 : DQO de 0.4 a 0.8).

Los sólidos suspendidos representan un 18% de los sólidos totales lo que indica que un tratamiento primario no sería de gran beneficio.

La relación de absorción de sodio de 0.6 a 9.5 la sitúa como agua buena para el riego agrícola (ref.12) y la conductividad eléctrica de 1 200 a 2 000 la sitúa como condicionada ya que se ubica dentro del rango de 750 a 2000, lo que indica que para su aprovechamiento en riego agrícola es necesario implementar prácticas de control y manejo, como lavados de suelo, adición de cal entre otras.

CUADRO 27. CARACTERISTICAS DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL EN POBLACIONES MEXICANAS MAYORES DE 10 000 HABITANTES.

| PARAMETRO | MEDIA (Concentración en mg/l, excepto donde se indique) | LIMITE INFERIOR | LIMITE SUPERIOR |
|---|--|-----------------|----------------------|
| pH (potencial de hidrógeno) | 7.5 | 6.8 | 8.2 |
| T°C (temperatura) | 21.6 | 17.7 | 25.6 |
| DBO (demanda bioquímica de oxígeno) | 243.7 | 191.7 | 296.4 |
| DQO (demanda química de oxígeno) | 508.0 | 425.4 | 590.6 |
| SSe (sólidos sedimentables) | 5.0 | 2.7 | 7.3 |
| GyA (grasas y aceites) | 81.5 | 55.4 | 107.6 |
| ST (sólidos totales) | 1 191.0 | 914.5 | 1 467.5 |
| SST (sólidos suspendidos totales) | 210.8 | 163.7 | 258.0 |
| SDT (sólidos disueltos totales) | 981.4 | 755.4 | 1 207.3 |
| SSV (sólidos suspendidos volátiles) | 139.9 | 107.5 | 172.2 |
| SSF (sólidos suspendidos fijos) | 96.8 | 39.4 | 154.1 |
| SDV (sólidos disueltos volátiles) | 340.2 | 193.3 | 487.1 |
| SDF (sólidos disueltos fijos) | 654.5 | 291.8 | 1 017.2 |
| COLOR (unidades Pt-Co) | 214.7 | 110.2 | 539.7 |
| COLIFORMES (NMP/100 ml) | 3.6x10 ⁸ | - | 11.6x10 ⁸ |
| COLIFORMES FECALES (NMP/100 ml) | 1.6x10 ⁸ | - | 6.6x10 ⁸ |
| N-NO ₃ (nitratos) | 0.5 | - | 0.9 |
| FENOLES | 0.1 | - | - |
| N-NH ₃ (amoníaco) | 19.3 | 14.5 | 24.2 |
| N _{total} (nitrógeno total) | 39.3 | 29.4 | 49.2 |
| N _{oxígeno} (nitrógeno orgánico) | 17.2 | 12.0 | 22.4 |
| N-NO ₂ (nitritos) | 0.5 | - | - |
| Cloro (Cl ⁻) | 140.8 | 58.5 | 223.1 |
| PO ₄ (fosfatos totales) | 23.0 | 8.8 | 37.2 |
| P _{total} (fósforo total) | 17.0 | 1.5 | 32.5 |
| P _{orgánico} (fósforo orgánico) | 3.0 | - | - |
| P _{inorgánico} (fósforo inorgánico) | 8.8 | - | - |
| Alcalinidad (como Ca CO ₃) | 323.2 | 145.3 | 501.2 |
| C.E. (conductividad eléctrica mhos/cm) | 1 558.1 | 1 162.3 | 1 954.0 |
| S.A.A.M. (detergentes) | 13.5 | 4.4 | 22.6 |
| SO ₄ (sulfatos) | 241.8 | - | 501.0 |
| RAS (relación de absorción de sodio) (s/u) | 5.1 | 0.6 | 9.5 |
| BORO | 3.1 | - | 8.5 |

(Ref. 39).

Nota: En las características presentadas no se incluyen las ciudades del noroeste de la República en las cuales existe intrusión salina en el agua de abastecimiento, y por consiguiente aumentan sensiblemente las concentraciones de sales en el agua residual.

Los valores están expresados en concentraciones en mg/l, excepto pH, temperatura CE y RAS.

4.0 CLASIFICACION DE SUELOS Y SU INTERRELACION CON EL RIEGO CON AGUA RESIDUAL

4.1 Clasificación de los suelos

Como se ha mencionado anteriormente, las relaciones que existen entre la práctica de regar con aguas residuales y el tipo de cultivo, están condicionadas por el tipo de suelo que prevalezca en las áreas agrícolas. Las características de cada tipo de suelo definen las propiedades hidrodinámicas, tales como: la capacidad retentiva del suelo, que es la cantidad máxima de agua que se puede retener en el suelo y el grado de captación o velocidad de absorción del agua de riego. Los dos aspectos anteriores determinan:

- a) tipo de riego a aplicar
- b) cantidad de agua retenida por el suelo
- c) cantidad de agua aprovechable por el cultivo

Por otra parte, es necesario asociar las características físicas de los suelos de las zonas potenciales de riego, para esto se utiliza el sistema FAO/UNESCO, CUADRO 28, que permite clasificar los tipos de suelos en los distritos de riego agrícolas detectados que utilizan agua residual en el país (Ver CUADRO 29) y que se ubican en la FIGURA 5; posteriormente se le deberán asociar las propiedades físicas más importantes de los suelos que son la textura y la estructura del suelo.

La clasificación de las partículas del suelo se muestra en el CUADRO 30.

4.1.1

CUADRO 28. PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE UNIDADES DE SUELO EN EL SISTEMA FAO/UNESCO

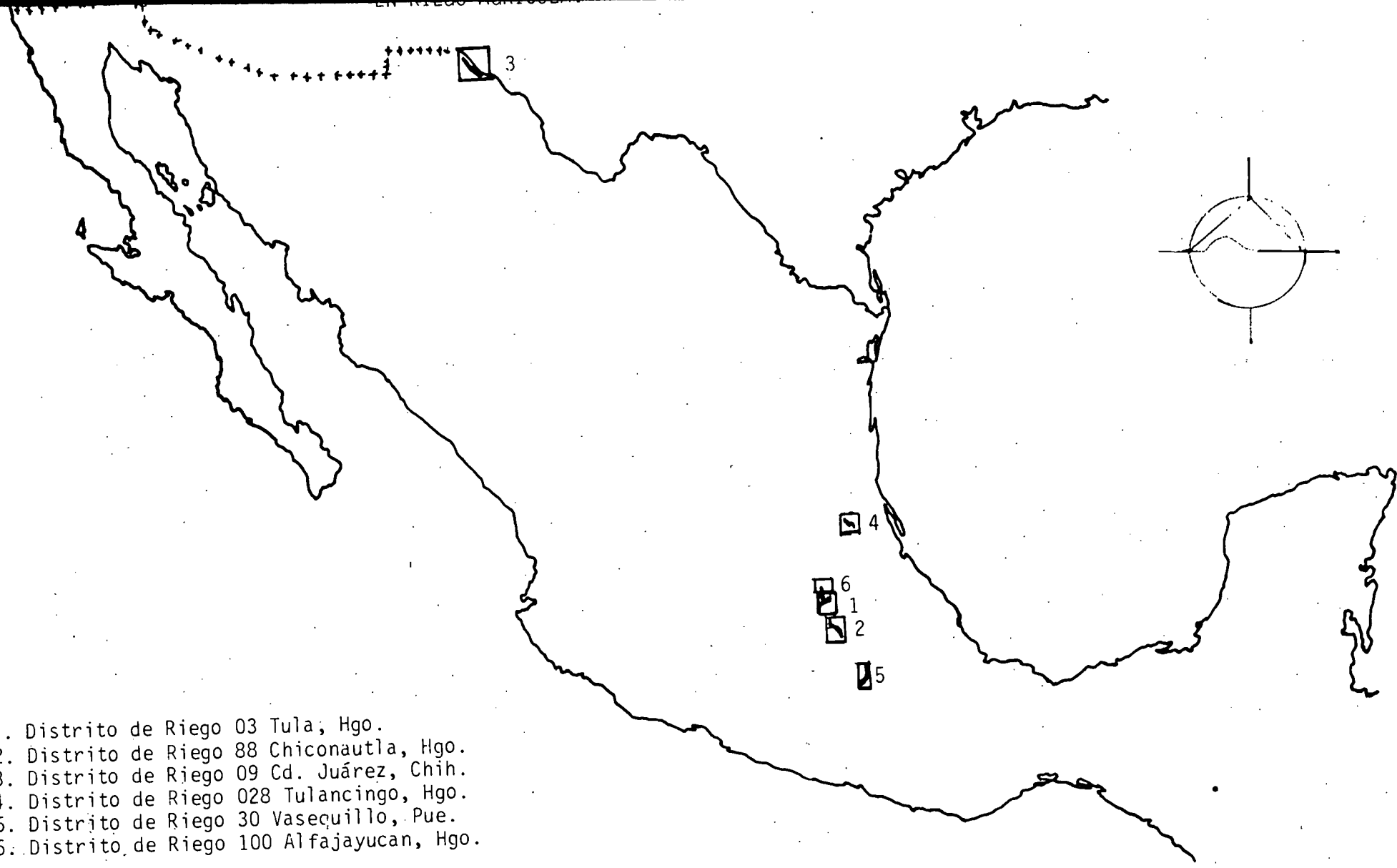
| UNIDAD | SIMBOLO | PRINCIPALES CARACTERISTICAS |
|-----------|---------|--|
| FLUVISOL | J | Suelos formados a partir de depósitos aluviales recientes puede presentar los siguientes horizontes: A. Ocrico color muy claro, muy escaso en materia orgánica y muy delgado. O. Por lo menos 30 cm de espesor, textura de migajón arenoso, o textura más fina que éste, en la fracción de suelo menor de 2 mm y más del 15% de arcilla. Un Gléyico a más de 50 cm de profundidad. |
| XEROSOL | X | Suelos secos de regiones semiáridas. Corresponden a suelos de clima árido Lluvia < 300 mm, y semiárido entre 300 y 800 mm. Suelos con horizonte, A. Ocrico desarrollado y un régimen de humedad arídico, son bajos en materia orgánica. |
| YERMOSOL | Y | Suelos correspondientes a clima árido (desiertos) Horizonte A. Ocrico color muy claro, muy escaso en materia orgánica y muy delgado, poco desarrollado. |
| ANDOSOL | T | Suelos de origen volcánico. Los horizontes que presentan estos suelos son: Gléyico, contiene alto contenido de materia orgánica, es fértil, (café y cacao). A. Câmico infértil se utiliza para caña de azúcar y maíz para autoconsumo. |
| SOLONCHAK | Z | Suelo con acumulación de sales solubles. Los horizontes que presentan son: Un horizonte A, horizonte O, Gléyico que se caracteriza por hidromorfismo muy marcado y el Câmico que tiene textura de migajón arenoso muy fino, algunos minerales carecen de color oscuro. |
| FEOZEM | H | Suelos oscuros y lixiviados, se encuentran en varias condiciones climáticas. El horizonte Feozem calcares es un suelo fértil. |
| REGOSOL | R | Suelos delgados sobre materiales no consolidados, pueden presentar los siguientes horizontes: A Ocrico, Gléyico a más de 50 cm de superficie. |
| VERTISOL | V | Suelos que se invierten, ricos en arcilla montmorilonítica que es de textura fina y color rojizo. |

Ref. 58

CUADRO 29. TIPOS DE SUELOS Y PRINCIPALES CULTIVOS DE LOS DISTRITOS DE RIEGO QUE APROVECHAN ACTUALMENTE AGUAS RESIDUALES EN RIEGO AGRICOLA.

| DISTRITO DE RIEGO | PRINCIPALES CULTIVOS | TIPO DE SUELO | TEXTURA |
|-----------------------|---|--------------------------------------|------------------|
| 03 Tula, Hgo. | Alfalfa, maíz, frijol, avena, calabacita, tomate, chile, cebada, trigo. | FEOSEM HAPLICO | Arcilla Limós |
| 88 Chiconautla, Hgo. | Avena forrajera, maíz forrajero, maíz grano, remolacha, alfalfa, cebada, trigo, frijol. | VERTISOL PELICO | Arcillas |
| 09 Cd. Juárez, Chih. | Algodón, alfalfa, trigo, sorgo forrajero | REGOSOL CALCARICO | Arenas |
| 028 Tulancingo, Hgo. | Pradera, maíz | LUVICOL CROMICO VERTISOL PELICO | |
| 30 Valsequillo, Pue. | Maíz, alfalfa, frijol, chile | RENDZINA FEOSEM HAPLICO | |
| 100 Alfajayucan, Hgo. | Maíz, frijol, alfalfa, avena, calabaza | FEOSEM HAPLICO CASTAÑOZEM CALCICO | |

Ref. 63



- 1. Distrito de Riego 03 Tula, Hgo.
- 2. Distrito de Riego 88 Chiconautla, Hgo.
- 3. Distrito de Riego 09 Cd. Juárez, Chih.
- 4. Distrito de Riego 028 Tulancingo, Hgo.
- 5. Distrito de Riego 30 Vasequillo, Pue.
- 6. Distrito de Riego 100 Alfajayucan, Hgo.

4.2 Propiedades de los suelos

Las siguientes propiedades ayudan a determinar la facilidad del suelo de abastecer nutrientes, agua y aire.

Textura

Es la sensación al tacto o la determinación de laboratorio que nos indica la proporción en que intervienen las diferentes partículas de arena, limo y arcilla. (Ref. 52).

Estructura

La estructura del suelo consiste en la disposición de las partículas del suelo en grupos o agregados.

Características hidrodinámicas y su relación con la textura y estructura

Las características hidrodinámicas se refieren a la capacidad que tiene el suelo para la circulación y retención del agua; éstas se muestran en el CUADRO 31.

CUADRO 30. CLASIFICACION DE LAS PARTICULAS DEL SUELO

| | SISTEMA DEL DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE ESTADOS UNIDOS | SISTEMA INTERNACIONAL |
|--------------------|--|--------------------------|
| Fracción del suelo | Diámetro límite mm | Diámetro límites mm |
| Arena muy gruesa | 2 - 1 | |
| Arena gruesa | 1 - 0.5 | 2 - 0.2 |
| Arena media | 0.5 - 0.25 | |
| Arena fina | 0.25 - 0.10 | 0.2 - 0.02 |
| Arena muy fina | 0.10 - 0.05 | 0.02 - 0.002 |
| Limos | 0.05 - 0.002 | |
| Arcilla | Menos de 0.002 | Menos de 0.002 |

Ref. 53

CUADRO 31. RELACION ENTRE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES FISICAS DE LOS SUELOS Y LAS CARACTERISTICAS HIDRODINAMICAS

| PROPIEDAD FISICA | CARACTERISTICA HIDRODINAMICA |
|---|---|
| <u>TEXTURA</u> | |
| Textura arcillosa < 0.002 mm | Mayor poder de retención de humedad Infiltración moderada o lenta Aumento de la resistencia a la labranza |
| Texturas areno-lomosas de 2 a 0.002 mm | Menor capacidad de retención de humedad Infiltración mayor Poca resistencia a la labranza |
| <u>ESTRUCTURA</u> | |
| Sin estructura | Poca o nula coherencia (buena aireación) Alta infiltración |
| Prismáticos; se caracterizan por agregados orientados verticalmente o pilares. Están comunmente en los horizontes del subsuelo de regiones áridas o semiáridas. | Buena infiltración |
| Aterronados | Buena infiltración |
| Granulares | Permeabilidad adecuada |
| Masivos laminados | Alta coherencia (baja aireación) Infiltración lenta o nula Baja permeabilidad |

(Ref. 23, anexo "Calidad del Agua").

En el CUADRO 32 se presentan la relación de la textura con el comportamiento hidrodinámico. Puede observarse que a mayor tamaño de partícula como en el caso de arena es menor la capacidad de retención de agua.

CUADRO 32. RELACION DE LA TEXTURA CON EL COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO

| TEXTURA | VELOCIDAD DE INFILTRACION | CAPACIDAD DE RETENCION DE AGUA |
|-----------|---------------------------|--------------------------------|
| Arena | 6 cm/h | 10% |
| Franca | 2-6 cm/h | 20% |
| Arcillosa | 0.5 cm/h | 30% |

(Ref. 23, anexo "Calidad del agua").

4.2.1 Salinidad y sodicidad

El término salino se aplica a suelos cuya conductividad del extracto de saturación es mayor de 4 $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C, con un porcentaje de sodio intercambiable menor de 15. Generalmente el pH es menor de 8.5.

Los cloruros y sulfatos son los principales aniones solubles que se presentan en estas muestras; el contenido de bicarbonato es relativamente bajo, y no se encuentra carbonato. El contenido de sodio soluble supera, en cierto grado, el de calcio y magnesio juntos, pero las relaciones de adsorción de sodio no son elevadas. El yeso y los carbonatos alcalinotérreos son componentes habituales de los suelos salinos. Como puede apreciarse por los valores de conduc

tividad eléctrica en los extractos de saturación, los niveles de salinidad son suficientemente altos y perjudican el crecimiento de casi todas las plantas. El mejoramiento de los suelos puede lograrse mediante el simple lavado, siempre que se cuente con drenaje adecuado. Los valores de

pH suelen ser mayores de 8.5, pero pueden reducirse si el porcentaje de sodio intercambiable no excede considerablemente de 15. Es raro encontrar yeso en estos suelos. El principal catión soluble es el sodio, y puede encontrarse en cantidades apreciables en forma de sales de carbonato y bicarbonato. La relación de adsorción de sodio en el extracto de saturación puede ser muy elevada. (Ref. 26).

El problema más común comprende aquellos suelos que contienen exceso de sales solubles y de sodio intercambiable y que se denominan suelos "salino sódicos". Los suelos salino sódicos son el resultado de los procesos de salinización y sodificación combinados. La apariencia y las propiedades son semejantes a los suelos salinos. (Ref. 53).

Para fines agrícolas estos suelos representan un problema que requiere la aplicación de medidas especiales y prácticas de manejo adecuadas. La clasificación de suelos en función de la conductividad eléctrica y el porcentaje de saturación se puede apreciar en el CUADRO 33.

CUADRO 33. CLASIFICACION DE SUELOS EN FUNCION DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA Y EL PORCIENTO DE SODIO.

| CLASE DE SUELO | CONDUCTIVIDAD ELECTRICA mmhos/cm | PORCIENTO DE SODIO INTERCAMBIABLE |
|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Normal | $0 \leq 4$ | 0 - 15 |
| Salino | > 4 | < 15 |
| Sódico | $0 \leq 4$ | > 15 |
| Salino-sódico | > 4 | > 15 |

Ref. 30

4.3 Clases de suelos y su relación con el riego con agua residual

Como ya se ha indicado anteriormente, el drenaje es un factor fundamental que depende sobre todo, de la textura, de la estructura y de las propiedades de éstas. Las tres clases de textura indicadas en la pirámide de la FIGURA 6, (arena, limo y arcilla) definen, según sea su proporción, las propiedades mecánicas que condicionan la capacidad de drenaje.

Arenas: incluye todos los suelos de los cuales a través del tamizado, la arena representa el 70% o más en peso de todo el material. (Ref. 53).

Los suelos arenosos tienen como características una elevada capacidad de drenaje lo que los hace aceptables para el riego con aguas residuales urbanas; es aconsejable para aquellos cultivos cuyas raíces no requieran exceso de agua durante largos períodos de tiempo.

Se define como suelos con buen drenaje los que tienen una capacidad de infiltración igual o superior a 5 cm/día. (Ref. 29).

Arcillas: para que un suelo sea designado como una arcilla debe tener como mínimo un 35% de fracción arcillosa, y en la mayor parte de los casos no menos del 40% o más; las características de ésta son dominantes y la clase se llama arcilla arenosa, arcilla limosa, o simplemente arcilla. Las arcillas arenosas contienen casi siempre más arena que arcilla (ref. 53).

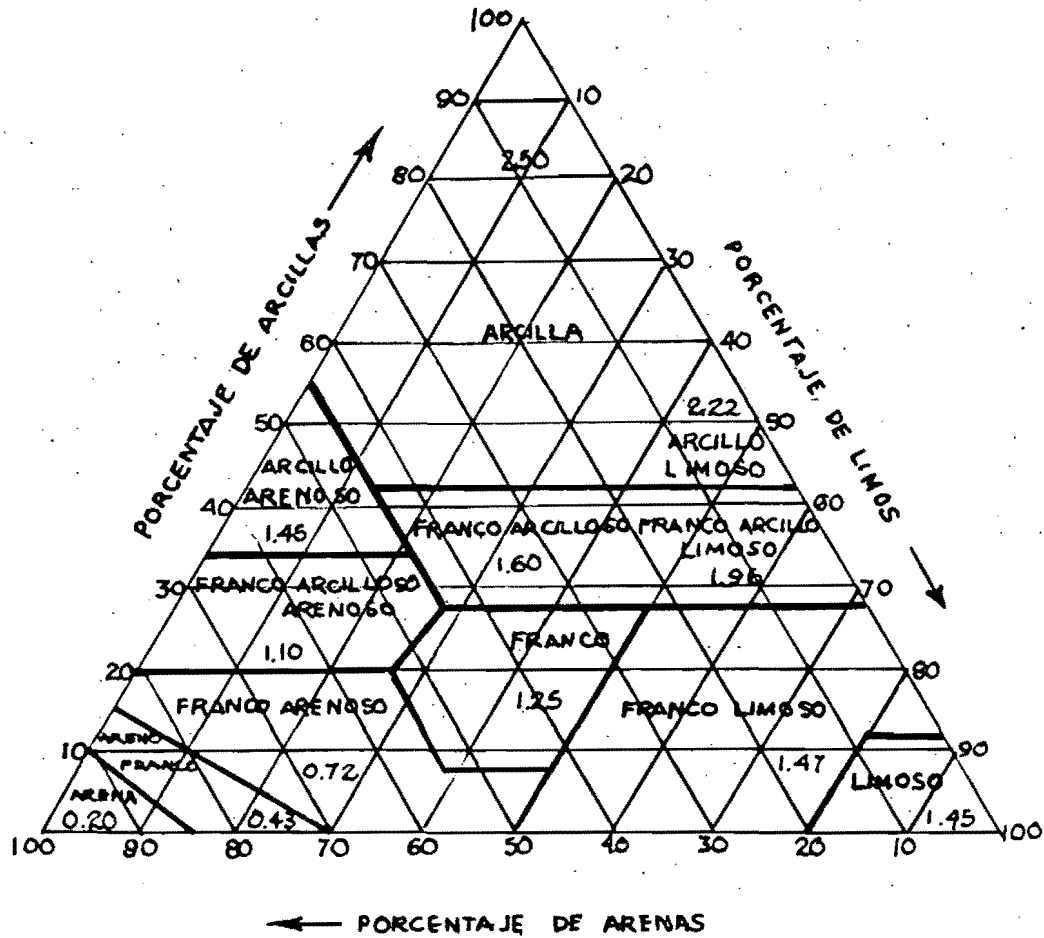
Los suelos de textura fina y pesados, como los arcillosos, tienen muy mal drenaje. El elevado contenido en arcilla hace que los horizontes sean casi impermeables por lo que con el riego con aguas residuales siempre aparecerá el problema de exceso de aplicación de agua y el peligro de encharcamiento.

Suelos francos: los suelos francos presentan propiedades adecuadas para la agricultura ya que la mezcla de partículas de arena, limo calcáreo y arcilla se encuentra en iguales proporciones. Los suelos francos en que predomina la arena, se denominan franco arenosos, por lo mismo existirán además, franco calcáreo y limoso, franco arcilloso limoso y franco arcilloso.

El estudio de las posibilidades de aplicación de aguas residuales a un tipo de suelo debe considerar la pirámide de texturas que involucra los porcentajes en tres dimensiones de arcillas, limos y arenas con la subsecuente clasificación del suelo por textura. Esta pirámide se presenta en la FIGURA 6, donde se muestra también las láminas que pueden retener los suelos en función de su textura, siendo estos valores aproximados y pudiendo variar en función, de otros parámetros, (ref. 18).

En los suelos pesados y de textura fina, como los arcillosos, debido a su deficiente drenaje solo es factible regar con aguas residuales mediante es correntía superficial y en este tipo de suelos el riego debe ser controlado

FIGURA 6. PROPORCIONES DE ARENA, LIMO Y ARCILLA Y LAMINAS APROVECHABLES EN DIFERENTES CLASES BASICAS DE TEXTURAS DE SUELOS



Las cantidades dentro del triángulo de texturas, indican la máxima lámina aprovechable (en cm), en 10 cm de profundidad del suelo de textura indicada (Ref. 53).

ya que siempre existirá el problema del encharcamiento.

4.4 Sistemas de aplicación de aguas residuales al suelo

Riego

El riego es la descarga controlada del agua residual sobre el suelo con el objeto de sustentar y favorecer el crecimiento de los cultivos. El riego puede llevarse a cabo por: aspersión, surcos y caballones e inundación.

Riego por aspersión

Únicamente es aplicable cuando el agua residual ha sido acondicionada mediante tratamiento secundario y desinfección debido a que el agua residual cruda obstruye tuberías por la materia orgánica y sólidos suspendidos y crea un medio favorable para formación de incrustaciones y dispersión de aerosoles.

FIGURA 7.

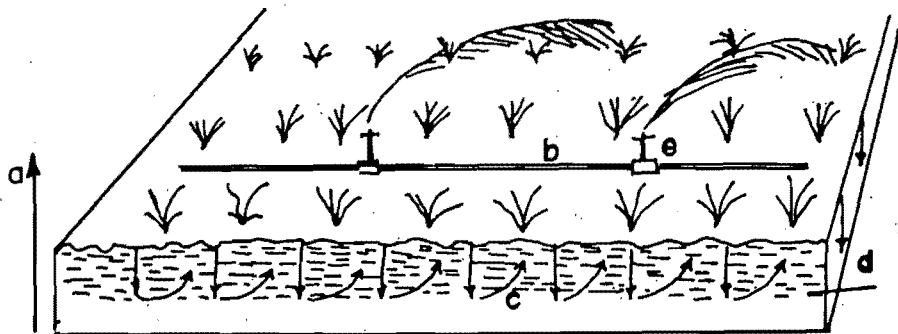
Riego por surcos y caballones

El agua se aplica mediante flujo por gravedad. El líquido llega por los surcos y va penetrando en el suelo; es recomendable tener un terreno llano para permitir un flujo lento del líquido por los surcos. Una vez realizado el vertido debe permitirse que los surcos se sequen pues se puede colmatar los poros del suelo. (Ref. 29). FIGURA 7.

Riego por inundación

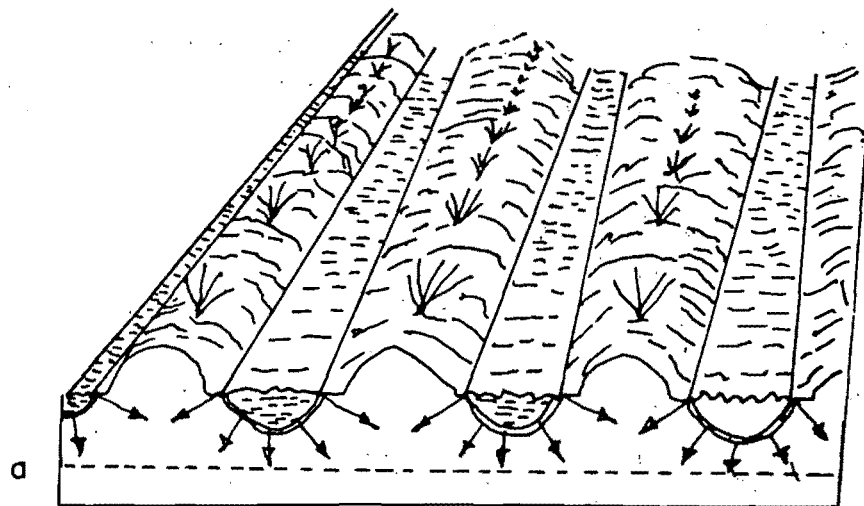
Consiste en inundar el suelo con un volumen elevado de vertido de forma que el líquido alcance cierta altura sobre el nivel del suelo; esta altura dependerá del tipo de suelo, del volumen del vertido y del tipo de cultivo. FIGURA 8.

FIGURA 7. SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSION Y POR SURCOS Y CABALLONES.



RIEGO POR ASPERSION

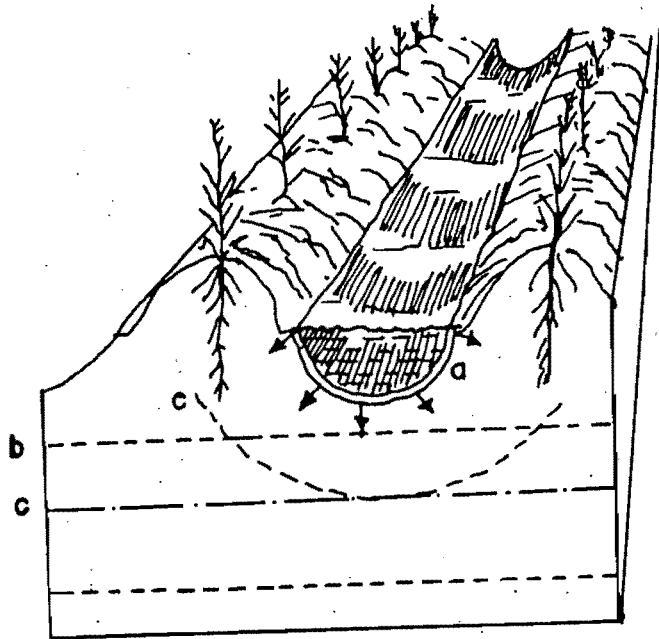
- a. Evaporación
- b. Conducción
- c. Absorción por las raíces
- d. Nivel de percolación
- e. Aspersor



B.- RIEGO POR SURCOS Y CABALLONES

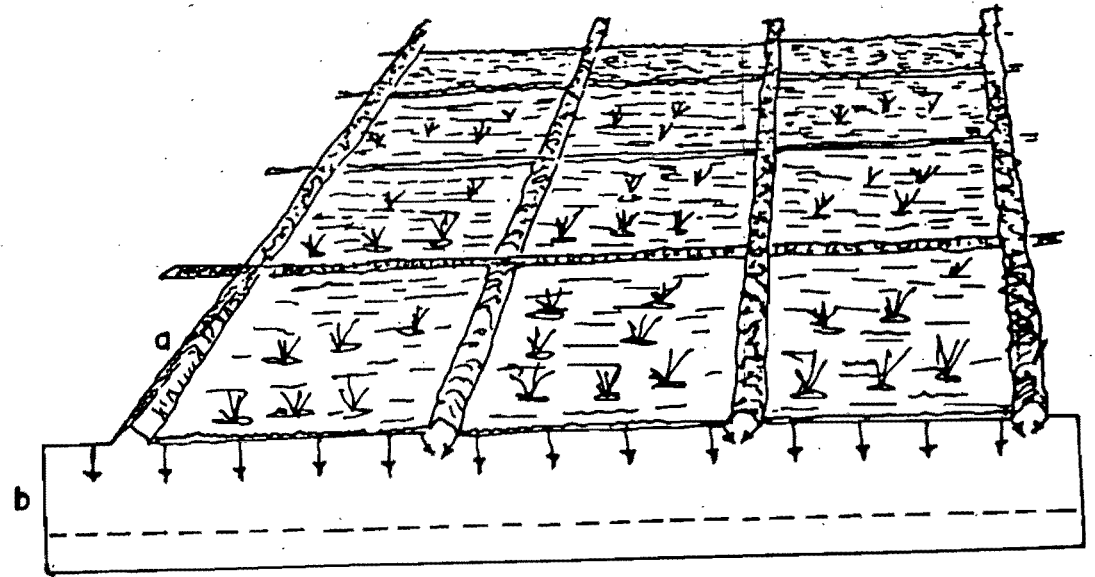
- a. Nivel de infiltración y precolación

FIGURA 8. SISTEMA DE RIEGO POR INUNDACION O ENCHARCAMIENTO.



**COLMATACION DE SURCO O DE UN TERRENO
POR EXCESO DE APLICACION**

- a. Pellicula de solidos materia organica y bacterias que impermeabiliza el suelo e impide la filtracion
- b. Nivel de infiltracion y percolacion muy deficiente
- c. Nivel normal de percolacion



RIEGO POR ENCHARCAMIENTO

- a. Caballones
- b. Nivel de percolacion

Infiltración-percolación

El método infiltración-percolación se basa en el vertido, con gran carga sobre un suelo, a través del cual se infiltra y percola, siendo depurado el líquido durante su movimiento por el suelo y subsuelo de una forma natural. Este sistema se utiliza como un sistema natural de tratamiento similar al de los filtros de arena intermitentes. El tipo de suelo adecuado es el arenoso o franco-arenoso. Este sistema se desarrolló inicialmente como un método de recarga de acuíferos o de eliminación de aguas residuales, pero actualmente se considera una forma útil de tratamiento de aguas residuales municipales (ref. 4). Ver FIGURA 9.

Se requieren suelos cuya capacidad de infiltración oscile entre 10 y 60 cm/día. Las finalidades de este sistema son: la recarga de niveles piezométricos, el tratamiento natural de un vertido con recuperación parcial o total por bombeo y el tratamiento natural de un vertido haciendo que se percole a través del suelo y del subsuelo hasta su incorporación a un curso normal de agua.

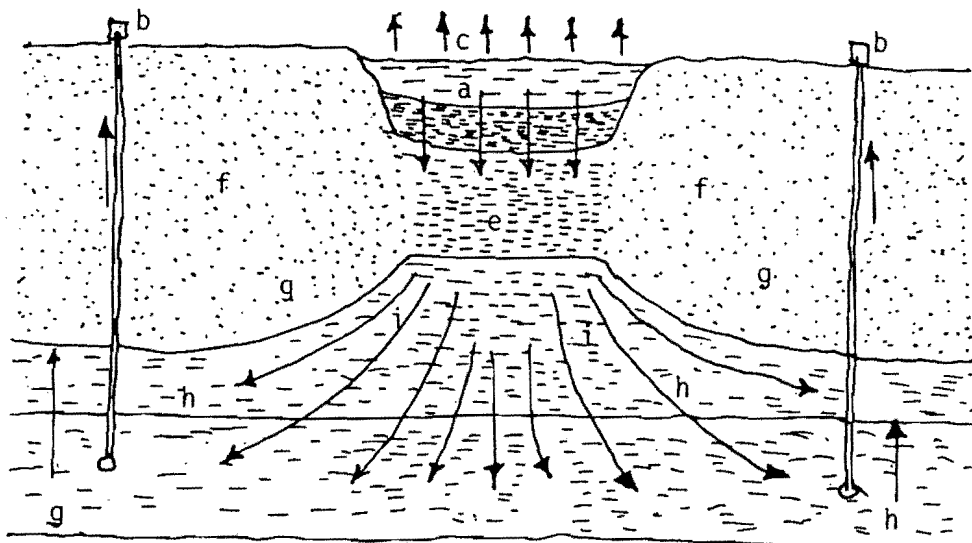
Criterios técnicos para seleccionar el sistema infiltración-percolación.

Los suelos más aceptables son los arenosos, los franco-arenosos y los que tienen alto contenido de grava. En general las gravas y arenas muy gruesas no son adecuadas para este sistema debido a que el agua residual pasa muy rápidamente por las capas superiores del suelo, que es donde se localiza la mayor parte de la actividad bioquímica. (Ref. 29).

La capacidad e intensidad de percolación influyen sobre la intensidad de la depuración y sobre la velocidad de movimiento del agua residual en el acuífero.

Las características del subsuelo son muy importantes, ya que si el acuífero está localizado en un nivel freático más elevado que hacia donde percola el agua residual, el agua natural existente en el acuífero no se contamina pero

FIGURA 9. SISTEMA DE RIEGO POR INFILTRACION PERCOLACION.



INFILTRACION - PERCOLACION

- a. laguna
- b,b. bombas de extraccion de agua. depurada.
- c. evaporacion
- d. infiltracion
- e. percolacion
- f,f. zonas no saturadas.
- g,g. nivel actual de recarga
- h,h. nivel piezometrico original
- i,i. movimiento de penetracion en el acuífero

se limita el volumen del vertido; mientras que, si el nivel freático del - acuífero está más bajo que el lugar de percolación del agua residual, el vertido se mezclará con el agua del acuífero y se incorporará a su movimiento. Para que esto último no ocurra se deben conocer antes las características del subsuelo y del acuífero, pues la recarga puede ser peligrosa y, en ciertos casos la contaminación irreversible. (Ref. 4).

4.5 Comportamiento en el suelo de la salinidad, boro y metales pesados aportados por el agua residual.

Efecto de las sales en suelos

Como ya se ha mencionado, las concentraciones altas de sodio y cloruros en suelos afectan el crecimiento de los cultivos; asimismo, los suelos con altos niveles de sodio intercambiable afectan las propiedades físicas ocasionando un drenaje deficiente. Debido a que los iones sodio están cargados positivamente son atraídos por los sitios negativos de las arcillas y por partículas orgánicas; de esta manera el suelo deja libre los iones de sodio y cloruro. La toxicidad por sales es más severa cuando el suelo está seco, de tal modo que los suelos sódicos deben ser lavados por un largo período antes de ser productivos. (Ref. 59).

Boro

El boro soluble se encuentra en los extractos de los suelos salinos en concentraciones de 2 a 100 mg/kg. El contenido de boro es un factor decisivo - para la clasificación de un suelo. Los boratos solubles tienden a acumularse conjuntamente a otras sales solubles en suelos de regiones áridas ocasionando un desarrollo anormal de las plantas. (Ref. 54).

Metales pesados

Se ha publicado en la bibliografía por numerosas fuentes que la cantidad de

elementos a nivel de rastros existentes en el suelo en forma soluble o asimilable es más importante que su contenido total, el cual incluye también el precipitado o insoluble. (Ref. 4, 29).

El comportamiento de los efectos de los metales pesados en suelos, está asociado necesariamente con el tipo de cultivo; esto se planteó en el capítulo 3.

El arsénico es adicionado al suelo mediante productos arsenicales para el control de plagas e insectos. Se han registrado concentraciones de 9.8 a 125 ppm. (Ref. 7). El arsénico agregado o presente en el suelo (ref. 7) es absorbido por la mayoría de los cultivos vegetales en pequeñas cantidades.

4.6 Criterios técnicos de la relación agua residual-suelo

El suelo es una de las limitantes de primer orden en el riego agrícola con aguas residuales, ya que estas últimas en un momento dado es posible acondicionarlas a las características deseadas, lo que es menos factible realizar con el suelo; por ello, es importante definir las consideraciones técnicas necesarias para la incorporación de áreas agrícolas al riego con aguas residuales, previniendo los problemas que puedan presentarse a corto y largo plazo en los distintos tipos de suelos.

Se han identificado de la revisión bibliográfica una serie de recomendaciones y conclusiones que se aplican al riego con aguas residuales y que se presentan a continuación (ref. 4, 53, 55, 56, 57, 58, 59).

- En suelos extremadamente arenosos con bajo contenido de materia orgánica es recomendable mantener el pH en el rango de 6.0 a 9.0.

- En suelos neutros o alcalinos con alta capacidad de adsorción se ha encontrado que concentraciones de 2 mg/l de boro en el agua de riego puede aplicarse por algún tiempo sin daño a plantas sensibles al boro. (Ref. 55).
- En el análisis de los suelos de Werribee, Australia (ref.50), en los que se usó agua residual cruda para el riego, se encontró un incremento de zinc, cobre, cadmio, cromo, cobalto y plomo en una capa de 2.5 cm de la parte superior del suelo. Los incrementos fueron aproximadamente equivalentes a las concentraciones de estos metales en el agua residual aplicada. La aportación de la materia orgánica en el suelo por un largo período de tiempo regando con agua residual cruda protege a las plantas de los efectos tóxicos de los metales pesados también presentes en el agua residual.
- En suelos ácidos se ha encontrado mayor concentración de cadmio, lo que indica que la concentración de cadmio en el suelo depende del pH de éste.

Una de las limitantes en el riego agrícola con aguas residuales es la posible contaminación del agua subterránea por virus y bacterias, las cuales en general presentan largos períodos de sobrevivencia. Este tipo de contaminación depende del tipo de virus y del tipo de suelo (ref. 4).

- Se ha encontrado que los virus se pueden mover rápidamente a través del subsuelo, logrando gran dispersión. (Ref. 4).
- Los materiales arcillosos adsorben eficientemente los virus mientras que los suelos orgánicos y los arenosos son adsorbentes pobres, por lo que la mayoría de los virus en este caso se incorporan a los retornos agrícolas.
- En suelos ácidos y neutros se favorece la adsorción del virus.

- Otro aspecto a considerar es la permeabilidad del suelo la cual depende de la velocidad de infiltración de las aguas de vertido. La permeabilidad es reducida cuando se sustituye calcio y magnesio por sodio el cual forma agregados organominerales del suelo. Los carbonatos y bicarbonatos en suelos calizos afectan la permeabilidad por la competencia que se establece entre el calcio del carbonato y el sodio de las aguas de riego. (Ref. 55).
- Cuando las sales solubles del suelo como los cloruros, los sulfatos, se concentran por efecto de una alta evaporación y/o drenaje deficientes ocurre el fenómeno de salinidad. (Ref. 53).
- Se considera salino aquel suelo cuya conductividad es de 4 milimhos/cm² a 24°C y están libres del problema de sodicidad siendo el pH del suelo inferior a 8.5.
- Se dice que un suelo es sódico cuando el porcentaje de sodio intercambiable es superior al 15% del total de la capacidad de intercambio catiónico. En este caso el pH del suelo es 8.5.
- Cuando se presentan las dos condiciones tanto de salinidad como de sodicidad actuando simultáneamente, se trata de un suelo salino-sódico, en este caso el pH es superior o muy cercano al valor 8.5. (Ref. 53).
- La salinidad se puede corregir con lavados, ya que con estos existe lixiviación que elimina las sales solubles del suelo.
- En donde existe sodicidad, ésta se puede corregir agregando yeso (sulfato de calcio) y luego proceder con el lavado, si se invierte el orden, de primero el lavado y después la adición de yeso, se puede agravar el problema.

- En las regiones húmedas, el agua de lluvia que se infiltra en el suelo lixivia la mayoría de las sustancias acumuladas. En cambio en regiones áridas es necesario el lavado para eliminar periódicamente las sales solubles del suelo. (Ref. 59).
- Las altas concentraciones de cloruro de sodio o sulfato de sodio son perjudiciales. Si la concentración del sodio es alta, la estructura del suelo sufre trastornos y con el tiempo se dispersan los coloides, trayendo como resultado un suelo duro o de consistencia parecida a la del caucho reduciendo la permeabilidad. Este tipo de selladura puede observarse incluso en - suelos arenosos. (Ref. 53).
- Las propiedades físicas de algunos suelos alcalinos incluyendo el grado de captación pueden mejorarse al agregar sustancias químicas por medio de - las cuales el sodio intercambiable puede sustituirse por calcio. Uno de estos químicos más comunes y baratos es el sulfato de calcio o yeso. (Ref. 53).
- Los suministros eventuales de agua cenagosa (limo) pueden ser benéficos en suelos arenosos gruesos porque los sedimentos mejoran las condiciones en - la zona de la raíz y reducen el grado de percolación del agua. (Ref. 55).

Los terrenos de riego en zonas áridas son generalmente de textura gruesa, - permeables hasta mayor profundidad y con suelo más fértil que los suelos de riego en las regiones húmedas. (Ref. 54).

Características de los suelos de las zonas áridas.

La descomposición de materia mineral y orgánica es más lenta en ausencia de agua, por consiguiente en climas muy secos la degradación es lenta y la li-

xiviación es mínima y algunos minerales altamente solubles, particularmente el carbonato de calcio, sales como el cloruro de sodio y potasio y el sulfato de sodio, así como los alcalis se concentran en el suelo. (Ref. 54).

La presencia de sales solubles en grandes cantidades causa coagulación de las partículas de arena. El enriquecimiento del suelo en sales de sodio modifica la estructura del suelo como resultado de la dispersión y los apelmazamientos de las arenas sódicas generalmente lo transforman en impermeable. (Ref. 53).

El cambio en la estructura del suelo debido a la acción de sales diferentes, tiene una influencia importante sobre el comportamiento del suelo en las condiciones del drenaje. El nivel de salinidad del agua de irrigación y el efecto de lixiviación de sales debe ser considerado en los cambios estructurales que se llevan a cabo en el suelo.

El agua subterránea en regiones áridas está siempre mineralizada en algún grado, las sales solubles se mueven por acción capilar y enriquecen la superficie del suelo con sales grises o blancas dependiendo del clima, la acumulación de sales son cloruros o sulfatos; el carbonato de sodio transforma el suelo en color negruzco. (Ref. 55).

La profundidad del agua subterránea a la cual la salinidad se manifiesta depende de la textura del suelo, de la permeabilidad y la salinidad original del agua subterránea. El conocimiento de la profundidad del acuífero es de vital importancia en el riego y drenaje de zonas áridas. (Ref. 58).

5.0 CRITERIOS TECNICOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

5.1 Resumen de Criterios

En el estudio de factibilidad de incorporación de nuevas áreas al riego agrícola aprovechando aguas residuales y del mejor aprovechamiento de éstas en las áreas ya establecidas, se pretende obtener el máximo beneficio, así como evitar efectos perjudiciales que pudieran presentarse. Con este fin se han identificado los componentes que deben considerarse, así como el criterio de uso que se recomienda para cada uno de ellos. Estos componentes son: protección del agua subterránea, tipo de suelo (características físicas y químicas), características de riego (láminas, tipo y calidad del agua), lavado de suelos y tipo de cultivos. Los resultados se presentan en el CUADRO 34.

Para obtener los criterios resumidos en el CUADRO 34 se analizaron los distintos parámetros con el siguiente procedimiento: Primero se identificaron los parámetros y criterios para la selección de la zona de riego indicados en el CUADRO 35. En base a este cuadro, se puede seleccionar en forma general una área agrícola con posibilidad de riego con aguas residuales, para después proceder a determinar el tipo de suelo que prevalece en dicha área utilizando la clasificación FAO-UNESCO del CUADRO 28, capítulo 4. A continuación se asocian las características particulares que están representadas por las condiciones físicas y químicas, que en el riego con aguas residuales se deben mantener de acuerdo con el tipo de suelo, como se indica en el CUADRO 36. En base a lo planteado anteriormente, para cada área factible de riego con aguas residuales se recomienda el tipo de riego, así como la lámina de éste.

En el CUADRO 37 se indican algunos criterios recomendables para la selección del tipo de riego, aclarando que dichos criterios pueden ser afinados en cada caso particular, mediante balances hidráulicos que consideren el uso consuntivo de cada cultivo.

CUADRO 34. CRITERIOS QUE SE PROPONEN PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN RIEGO AGRICOLA.

| COMPONENTE | CRITERIOS DE APLICACION |
|--|---|
| Protección de Aguas Subterráneas | <p>Suelos con alta permeabilidad (>6cm/h) arenosos; profundidad mínima del acuífero 6 m. Suelos francos; profundidad mínima 3 m. Suelos arcillosos; profundidad mínima 1.5 m</p> |
| Tipo de Suelo (Características físicas) | <p><u>FRANCOS</u>: Son más aceptables los suelos francos por su velocidad de infiltración media de 2 a 6 cm/h.</p> <p><u>ARENOSOS</u>: Es conveniente el riego con aguas residuales ricas en materia orgánica para disminuir la capacidad de infiltración.</p> <p>La salinidad y sodicidad del agua de riego generalmente no representan problemas.</p> <p>Es recomendable para cultivos con pocos requerimientos de agua.</p> <p><u>ARCILLOSOS</u>: No se recomienda el riego por inundación porque se pueden presentar condiciones anaerobias y rápida colmatación del suelo.</p> <p>Se debe controlar la salinidad y sodicidad del agua de riego, asegurando una conductividad menor de 1500 μmhos/cm.</p> <p>Control en aplicación de riegos para evitar encharcamiento.</p> <p>Se recomienda el riego de cultivos tolerantes a salinidad y sodicidad, y con pocos requerimientos de agua.</p> |
| Tipo de Suelo (Características químicas) | <p><u>SALINOS</u>: Acondicionarlos mediante lavados antes de su incorporación al riego. Utilizar cultivos tolerantes y semitolerantes a la salinidad.</p> <p><u>SODICOS</u>: Adicionar carbonato de calcio (yeso) y después efectuar lavados, sobre todo en suelos con problemas de poca permeabilidad.</p> |



DEPFI

| COMPONENTE | CRITERIOS DE APLICACION |
|---------------------------|--|
| Lavado de Suelo | <p><u>CALIZOS</u>: Abatir la concentración de sodio en agua de riego mediante adición de yeso; es recomendable regar con agua de bajo contenido de materia orgánica.</p> <p>Se incrementa la lámina de riego cierto porcentaje, dependiendo de la salinidad del agua y del tipo de cultivo. El rango va desde 14 a 56% para conductividad de agua 2200 $\mu\text{m}/\text{cm}$, hasta 31 a 62.5% de la lámina de riego para conductividad de 5000 $\mu\text{m}/\text{cm}$. (Ver CUADRO 40).</p> |
| Medidas Preventivas | <p>Dejar una distancia mínima de 100 m entre canales y presas, y los núcleos de población.</p> <p>No colocar los productos cosechados sobre el suelo.</p> <p>Campañas periódicas de análisis clínicos para los trabajadores agrícolas y sus familias.</p> <p>Evitar los abrevaderos para ganado con este tipo de agua.</p> <p>Control sanitario de los productos del ganado que ha sido alimentado con forrajes regados con este tipo de agua, como la alfalfa, cebada, etc.</p> |
| Láminas de Riego | <p>Dependen del cultivo, condiciones climáticas y tipo de suelo el rango va desde: 0.5 cm/semana a 6.0 cm/semana según la especie de que se trate. El vertido sobre zonas forestales admite hasta 20 cm/semana.</p> <p>Se recomienda adicionar un 10% por el uso de agua residual, a la lámina de riego usual para agua de primer uso.</p> |
| Calidad del Agua de Riego | <p><u>CALIDAD AGRONOMICA</u>: Salinidad, Cloruros y Sodio. Dependiendo del tipo de suelo y de la conductividad eléctrica puede ser de uso adecuado, condicionado y no recomendable. Control mediante monitoreo de retornos agrícolas. (Ver CAPITULO 3).</p> <p><u>CALIDAD SANITARIA</u>: Tóxicos y microorganismos patógenos. Para la clasificación condicionada, aplicar control en las fuentes de origen o tratamiento primario; para la clasificación no recomendable, control en fuentes de origen o tratamiento se-</p> |

| COMPONENTE | CRITERIOS DE APLICACION |
|---------------|--|
| | <p>cundario.</p> <p>Adicionar yeso para propiciar precipitación de tóxicos.</p> <p>Control mediante monitoreo de influentes y efluentes.</p> <p>Evitar las descargas no tratadas de hospitales y rastros que están conectadas a la red de drenaje.</p> <p><u>ASPERSION</u>: Únicamente se puede utilizar este tipo de riego con agua que haya sido sedimentada y desinfectada.</p> <p><u>INUNDACION O ENCHARCAMIENTO</u>: Se restringe este tipo de riego con agua sin tratar en tipo de suelo vertisol.</p> <p><u>RIEGO</u>: Cualquiera de sus modalidades es apta para la aplicación de aguas residuales.</p> <p>Evitar el riego con aguas residuales que no sean sedimentadas y desinfectadas de: betabel, rábano, nabo, zanahoria, cebolla, fresa, cilantro, lechuga, apio, espinaca, acelgas, berros, soya germinada, calabacita, pepino, jitomate, poro, perejil, quelite, ajo y col.</p> <p>Evitar el pastoreo en campos forrajeros que no estén completamente secos.</p> <p>Suspender el riego dos semanas antes de su cosecha en los cultivos de cereales y herbáceas que no sufren pastoreo y una semana antes de su cosecha en los árboles frutales.</p> <p>Se puede regar con agua residual libres de tóxicos sin tratar en los siguientes casos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Plantaciones de cultivos para procesamiento industrial (que incluya control sanitario estricto). 2. Granos, semillas y oleaginosas (sujeto a condiciones anteriores y control sanitario del producto). 3. Plantas ornamentales y flores de invernadero. 4. Suelos sin ningún uso agrícola 5. Zonas forestales <p>Evitar el riego de cultivos que requieren inundación como el caso del arroz en suelo vertisol.</p> |
| Tipo de Riego | |

CUADRO 35. PARAMETROS FISICOS Y CRITERIOS PARA LA SELECCION DE UNA ZONA DE RIEGO UTILIZANDO AGUAS RESIDUALES.

| PARAMETRO | CRITERIO DE APLICACION |
|---|---|
| Drenaje | Se prefieren en general suelos bien drenados. |
| Tipo de suelo | Los mejores son los suelos francos, pero también son aceptables los arenosos y los intermedios entre arenosos y arcillosos. |
| Profundidad del suelo | La más aceptable es la uniforme y comprendida entre 1.5 y 1.8 m. |
| Profundidad del acuífero | Mínima 1.50 m. En este caso se hace necesario un drenaje. |
| Control del acuífero | Es aconsejable para asegurar su renovación si el nivel freático está a una profundidad inferior a 3m. |
| Movimientos del acuífero | Se deben conocer su dirección y su velocidad. |
| Pendientes | Máxima 15% |
| Aislamiento: | Debe existir cierta separación de las áreas pobladas; este aislamiento dependerá de las características del vertido, del tipo de cosechas, del sistema de aplicación, de las características del área de vertido y de su entorno (es decir si se trata de áreas industriales, turísticas, residenciales). |
| Distancia del centro de producción del agua residual. | La aplicación dependerá de consideraciones económicas y topográficas. |

Ref. 29.

5.1.1 Criterios con respecto al tipo de suelo

En el CUADRO 36 se presentan las condiciones que se recomienda mantener dependiendo de las características físicas y químicas del suelo.

CUADRO 36. CRITERIOS CON RESPECTO AL TIPO DE SUELO

| TIPO DE SUELOS | CARACTERISTICAS | CONDICIONES QUE SE DEBEN MANTENER |
|---------------------------|--|--|
| Extremadamente arenosos | Bajo contenido en materia orgánica | pH de 6.0 a 9.0 |
| Neutros o alcalinos | Alta capacidad de adsorción | Se pueden regar cultivos sensibles con concentraciones de boro de 2 mg/l en el agua. |
| Orgánico y arenosos | Adsorbentes pobres de virus | Controlar los retornos agrícolas en cuanto a presencia de virus. |
| Calizos | Se afecta la permeabilidad del suelo por la competencia que se establece entre el calcio del carbonato y el sodio de las aguas de riego. | Acondicionar las aguas de riego a bajo contenido de sodio. |
| Sódicos | Pequeñas áreas se encuentran en zonas áridas y semiáridas; el pH se encuentra entre 8.5 y 10; se presenta drenaje deficiente. | Adicionar al suelo o agua de riego carbonato de calcio (yeso). Efectuar lavados periódicos. |
| Suelos de regiones áridas | Tienden a acumular sales solubles, ocasionando desarrollo anormal en plantas. | Controlar salinidad y boro en aguas de riego. |
| Arenosos | Elevada capacidad de drenaje; mayor de 6 cm/h y capacidad de retención de agua del 10%. | Cultivos cuyas raíces no admitan exceso de agua durante largos períodos de tiempo. |
| Arcillosos | Pesados y de textura fina; drenaje deficiente; velocidad de infiltración de 0.5 cm/h; capacidad de retención del 30%. | Control en el riego para evitar encharcamiento. |
| Francos | Velocidad de infiltración de 2 a 6 cm/h y 20% de capacidad de retención. | Presenta propiedades adecuadas para el riego con agua residual. |
| Salinos | Presencia de costras blancas sobre la superficie; pH del suelo menor de 8.5 | |

(Resumen de este estudio).

5.1.2 Criterios con respecto al tipo de riego y láminas de riego.

CUADRO 37. CRITERIOS PARA LA APLICACION DE TIPO DE RIEGO.

| TIPO DE RIEGO | CARACTERISTICAS | CONDICIONES QUE SE DEBEN MANTENER. |
|--------------------------|--|--|
| Surcos y caballones | Aplicación del agua por gravedad | Recomendable el terreno llano; se debe efectuar cuando el suelo esté seco para evitar la colmatación. |
| Inundación | Inundación de un terreno | La altura del agua con respecto al nivel del suelo depende del tipo de suelo, volumen de vertido y tipo de cultivo. |
| Infiltración percolación | Se utiliza como sistema natural de tratamiento; el tipo de suelo adecuado es el arenoso o franco arenoso y los que tienen alto contenido de grava. | Se requieren suelos cuya capacidad de infiltración oscile entre 10 y 60 cm/día. El acuífero debe localizarse más elevado que el lugar hacia donde percola el agua de riego para evitar contaminación. |

Láminas de riego

Las láminas de riego dependen primordialmente: del tipo de suelo, de la clase de cultivo, de las características del agua residual y de la climatología. Se han publicado en la bibliografía valores para las láminas de riego que varían de 1 a 11 cm/semana de agua residual. Los cultivos generalmente requieren de 0.5 a 6 cm/semana; según el cultivo de que se trate. (Ref. 29).

De acuerdo con el tipo de suelo se han determinado las láminas de agua que pueden retener en función de la textura; estos valores son aproximados y pueden variar en función de otros factores físicos del suelo, (ref. 18). Ver CUADRO

38, FIGURA 8, CAPITULO 4).

CUADRO 38. LAMINA QUE PUEDE RETENER EN 10 CM DE PROFUNDIDAD DE CADA TIPO DE SUELO.

| TEXTURA | LAMINA APROVECHABLE EN CM |
|--------------------------|---------------------------|
| Arena | 0.20 |
| Arenoso-franco | 0.43 |
| Franco-arenoso | 0.72 |
| Franco-arcilloso-arenoso | 1.10 |
| Franco | 1.25 |
| Arcillo-arenoso | 1.45 |
| Limoso | 1.45 |
| Franco-limoso | 1.47 |
| Franco-arcilloso | 1.60 |
| Franco-arcilloso-limoso | 1.96 |
| Arcillo-limoso | 2.22 |
| Arcilla | 2.50 |

Ref. 53.

Por otra parte, de acuerdo a los datos publicados en 1981 por la Dirección General de Economía Agrícola de México (59), para cada entidad federativa, en el ciclo agrícola de 1977 las láminas brutas en centímetros que se han aplicado se indican en el CUADRO 39.

CUADRO 39. LAMINAS DE RIEGO APLICADAS DURANTE EL CICLO AGRICOLA 1977 (AGUAS DE PRIMER USO).

| ENTIDAD | LAMINA BRUTA EN CM |
|-----------------|--------------------|
| Hidalgo | 48.1 |
| B.C.N. | 54.0 |
| Chihuahua | 72.7 |
| Región Lagunera | 73.0 |
| Guanajuato | 59.0 |
| México | 32.9 |
| Michoacán | 42.4 |
| Puebla | 93.3 |
| Sinaloa | 60.4 |
| Sonora | 94.6 |
| Tamaulipas | 42.2 |
| Veracruz | 169.1 |

Ref. 60.

5.2 Requerimientos de lavado

Las necesidades de lavado están asociadas a suelos que presentan problemas de salinidad. El término "salino" se aplica a suelos cuya conductividad del extracto de saturación es mayor de 4000 $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C. En este tipo de suelos, el establecimiento de un drenaje adecuado permite eliminar parte de la salinidad por lavado, que se define como la cantidad mínima de agua extra que se percola a través de la zona activa de la raíz para prevenir la acumulación excesiva de sales. (Ref. 26):

La aplicación del agua de lavado está en relación directa con la conductividad eléctrica (CE) de agua de retorno agrícola y la conductividad eléctrica del agua de riego, ambas expresadas en $\mu\text{mhos/cm}$.

$$\text{Requerimiento de lavado} = \frac{\text{CE } (\mu\text{mhos/cm}) \text{ agua riego}}{\text{CE } (\mu\text{mhos/cm}) \text{ retorno agrícola}} + 100$$

Es conveniente tomar en consideración que las necesidades de lavado pueden ser cubiertas por efectos de lluvia o por condiciones naturales de drenaje adecuado aún en las regiones semiáridas, si la precipitación tiene lugar en un corto período del año (2 ó 3 meses).

Los requerimientos de lavado se expresan como el porcentaje adicional que se aplica a la lámina de riego normal, resultando la lámina (total) para cada caso particular. Los porcentajes se presentan en el CUADRO 40.

Del CUADRO 40 se obtiene que a medida que el agua de riego es más salina es necesario aplicar en orden creciente láminas, de sobre riego.

CUADRO 40. PORCENTAJES QUE SE APLICAN A LA LAMINA DE RIEGO PARA OBTENER EL AGUA NECESARIA DE LAVADO DEPENDIENDO DE LA SALINIDAD DEL AGUA DE RIEGO Y DE LA SALINIDAD MAXIMA TOLERADA EN RETORNOS AGRICOLAS.

| VALOR MAXIMO TOLERADO DE CONDUCTIVIDAD EN AGUA DE RETORNO AGRICOLA ($\mu\text{mohs/cm}$ a 25°C) | PORCENTAJE DEL AGUA DE LAMINA DE RIEGO QUE DEBE SER APLICADO PARA LAVADO | | | | |
|--|---|-----|------|------|------|
| | Conductividad del agua de riego en micromhos/cm | | | | |
| | 100 | 250 | 750 | 2200 | 5000 |
| 0 - 2 Efectos despreciables | | - | - | - | - |
| 2 - 4 Afecta rendimientos de cultivos muy sensibles | 2.5 | 6.2 | 18.8 | 56.2 | |
| 4 - 8 Sólo es apta para cultivos semitolerantes | 1.2 | 3.1 | 9.4 | 28.1 | 62.5 |
| 8 - 16 Apta para cultivos tolerantes | 0.8 | 2.1 | 6.2 | 18.8 | 41.7 |
| 16 Lista restringida de cultivos tolerantes | 0.6 | 1.6 | 4.7 | 14.1 | 31.2 |

Ref. 26.

5.3 Criterios y Recomendaciones de Operación

En los puntos anteriores se han planteado aquellos criterios que limitan la selección de una área para riego con aguas residuales, así como los que se relacionan con las propiedades hidrodinámicas, físicas y químicas de los suelos, (CUADRO RESUMEN 34) por lo que a continuación se señalan los criterios operativos, así como recomendaciones desde el punto de vista sanitario.

- Evitar el riego con aguas residuales cuando el número más probable de coliformes totales NMP exceda de 1000/100 ml de los siguientes cultivos: betabel, rábano, nabó, zanahoria, cebolla, fresa, cilantro, lechuga, apio, espinacas, acelgas, berros, soya germinada, calabacita, pepino, jitomate, poro, brócoli, perejil, quelite, ajo y col. Así como otros cultivos que se consumen crudos y que tienen contacto con el agua de riego.
- No se debe efectuar pastoreo en los campos forrajeros que hayan sido regados con aguas residuales y no estén completamente secos; además, la carne que se destine a consumo humano debe ser sujeta a inspección estricta fito sanitaria.
- Restringir el riego por inundación con aguas residuales en áreas con problemas de drenaje, de sodicidad y expansividad de arcillas en suelos identificados como Gleisoles y Vertisoles, en tanto no se tengan estudios que justifiquen su incorporación al riego. En este tipo de suelo se deben recomendar cultivos tolerantes a salinidad y sodio y con pocos requerimientos de agua.
- Únicamente se puede utilizar el riego por aspersión con aguas residuales que hayan sido sujetas a sedimentación y desinfección.

- No es recomendable el riego con aguas residuales que contengan valores mayores a los siguientes componentes: (ref. 31)

| | mg/l |
|--|---------|
| Arsénico | 2.0 |
| Cadmio | 0.05 |
| Cromo hexavalente | 5.0 |
| Mercurio | 0.005 |
| Plomo | 5.00 |
| Cianuro | 0.10 |
| Aluminio | 5.0 |
| Conductividad eléctrica (mhos/cm a 25°C) | 3000 |
| Relación de absorción de sodio RAS (me/l) | 18 |
| pH | 6.0-9.0 |
| Boro | 2.5-4.0 |
| Fenoles | 1.0 |
| Níquel | 2.0 |
| Zinc | 10.0 |

Ref. 33.

- En caso de superar los valores anteriores, si se trata de volúmenes grandes de riego, se recomienda controlar las fuentes de origen; y si son pequeños volúmenes, determinar si es factible técnica y económicamente dar tratamiento secundario o avanzado.
- Los valores anteriores se podrán modificar, en caso de que existan estudios locales que consideren el tipo de suelo, tipo de cultivo y condiciones climatológicas, en los cuales se demuestre que no existen efectos perjudiciales.
- Suspender el riego por lo menos dos semanas antes de su cosecha en los cultivos de cereales y herbáceas que no sufren pastoreo; y una semana antes de su cosecha, los árboles frutales.

- Evitar el riego de cultivos que requieren inundación como el caso del arroz.

Se pueden proceder al riego o vertido de aguas residuales sin tratar en los siguientes casos:

- 1.- Plantaciones de cultivo para procesamiento industrial.
- 2.- Granos, semillas y oleaginosas.
- 3.- Plantas ornamentales y flores de invernadero.
- 4.- Suelos sin ningún uso agrícola.
- 5.- Zonas forestales.

- La sodificación del suelo disminuye la permeabilidad y se puede reducir mediante la adición de yeso y después lavado.

- Evitar regar con aguas residuales superficies donde afloren los mantos de aguas freáticas o cuando existan estratos rocosos con fisuras o estructura cárstica, en áreas agrícolas con niveles piezométricos menores de 3.0 m, así como en zonas con acuíferos en explotación, a menos que se dicte que en función del tipo de suelos y de las características de los acuíferos subyacentes, no se llegue a contaminar el agua subterránea.

- En suelos con permeabilidad e infiltración moderada y lenta se recomienda controlar los drenes agrícolas mediante desazolvamiento para evitar salinización de suelos.

- Los trabajadores agrícolas que manejen las aguas residuales deberán someterse a vacunaciones y otras condiciones de profilaxis, contra las infec-

ciones gastrointestinales por lo menos una vez al año. Asimismo, deberán establecerse oficinas de asesoría técnica, de control de riego y de control sanitario.

- Se recomienda fomentar la preparación de personal calificado para la asesoría y supervisión de la reutilización agrícola de las aguas residuales.
- Se recomienda guardar una distancia mínima de 100 m entre las áreas de aplicación y las zonas pobladas.
- Se sugiere que los canales y red de distribución sean revestidos con materiales de baja permeabilidad especialmente en zonas de alta infiltración o en las cercanías de pozos o manantiales de abastecimiento público de aguas.
- Es conveniente que los canales sean descubiertos para incrementar la oxidación superficial de las aguas, y evitar la posibilidad de fuga o tomas parcelarias.
- Vigilar la calidad del agua residual evitando descargas no tratadas de industrias incompatibles y de aportadores de contaminación biológica como hospitales y rastros. En todo caso cualquier incorporación de descargas al flujo general de las aguas residuales destinadas al riego agrícola, deberá ser objeto de permiso especial expedido por la autoridad competente.
- En suelos donde se presente abundancia de algún elemento tóxico como boro, cloruros, manganeso se deben aplicar las aguas de riego bajo estricto control técnico.

6.0 METODOLOGIA PROPUESTA PARA EL ANALISIS DE LOS DISTRITOS DE RIEGO EXISTENTES Y SELECCION DE NUEVAS AREAS.

En el diagrama de bloques presentado en la FIGURA 10, se muestra la interrelación entre agua residual, suelo, cultivos y agua subterránea, planteando la metodología a seguir para la selección de nuevas áreas susceptibles de ser regadas con aguas residuales.

La metodología propuesta consiste en lo siguiente:

- a) Clasificación del agua residual disponible para riego definiendo: su calidad sanitaria en función de los valores máximos recomendables para ciertos contaminantes que se describen en el capítulo anterior, y la calidad agronómica que se define por la salinidad y sodicidad.
- b) Con respecto al suelo, se propone identificar los distritos de riego que utilizan agua residual así como las áreas potenciales de ser regadas con este tipo de aguas en zonas áridas y semiáridas del país próximas a poblaciones mayores de 100 000 habitantes, clasificar el tipo de suelo en base al sistema FAO/UNESCO y a la textura, determinando las propiedades hidrodinámicas más importantes en cada caso.
- c) Tomando en cuenta a) y b) y la información de DETENAL, identificar los cultivos aptos: en zonas con poca disponibilidad de agua, y en base a la acidez, sodicidad, salinidad y profundidad efectiva del suelo, considerando el patrón de cultivos existente de cada área agrícola.
- d) También se debe tomar en cuenta, de acuerdo al tipo de suelo y a la existencia y profundidad de los acuíferos, el riesgo de afectación, o posible contaminación por el riego con aguas residuales.

ANÁLISIS DE LOS DISTritos YA EXISTENTES

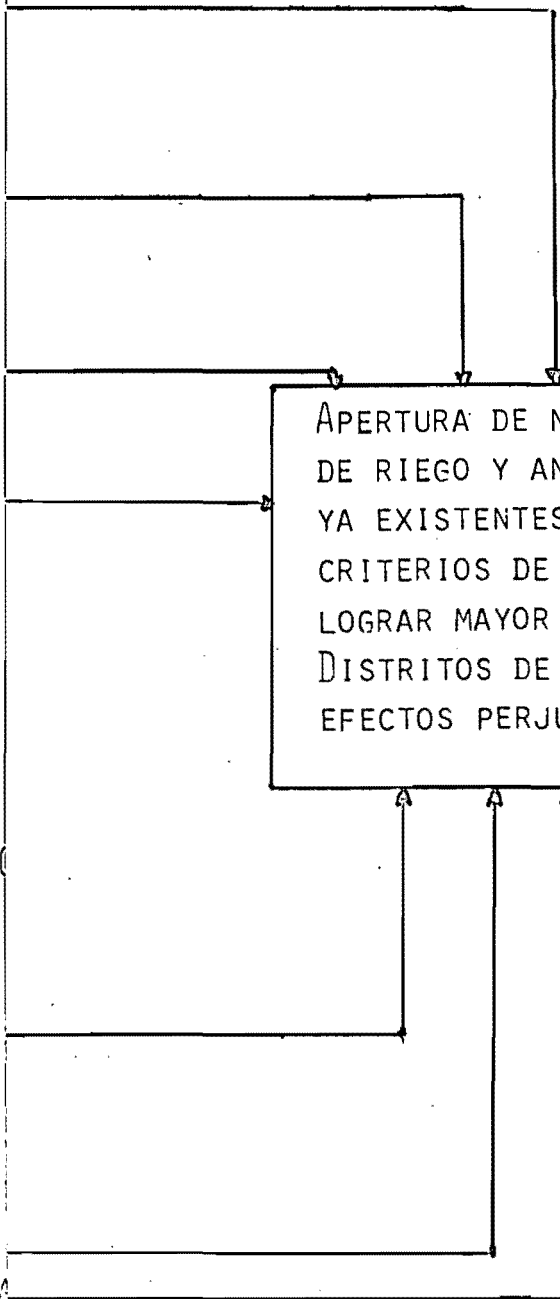
GUA

UELO

UIFERO

SISTEMA

APERTURA DE NUEVAS ÁREAS DE RIEGO Y ANÁLISIS DE LAS YA EXISTENTES APLICANDO CRITERIOS DE OPERACION PARA LOGRAR MAYOR EFICIENCIA EN DISTritos DE RIEGO Y PREVENIR EFECTOS PERJUDICIALES.



Tales aspectos facultan, en cada caso, describir los criterios de operación para lograr mayor eficiencia en los distritos de riego y prevenir efectos perjudiciales.

Finalmente deben incluirse los aspectos de control y operación para el control del riego con agua residual.

Conforme a esta metodología propuesta, se presenta un ejemplo de aplicación del Distrito de Riego 30 localizado en Valsequillo, en el estado de Puebla, que lleva varios años en operación.

6.1 Ejemplo de aplicación de metodología propuesta

6.1.1 Distrito de Riego 03 - Valsequillo, Puebla.

Con el objeto de ejemplificar la metodología propuesta, se presenta a continuación el análisis y discusión del D.R.30 Valsequillo, Pue. para esto se procedió a caracterizar el distrito de riego, puntualizando que el agua residual aprovechada procede de la ciudad de Puebla y de San Martín Texmelucan, Puebla.

Una limitante importante para caracterizar agronómicamente el agua residual, la constituyen los datos del monitoreo físico-químico disponibles, ya que no siempre incluyen los parámetros requeridos. Así se procedió a tratar de caracterizarla mediante correlación de los datos del análisis del agua de abastecimiento de acuerdo a la referencia 23. En los CUADROS 41 y 42 se presentan los resultados obtenidos de esta correlación.

Los resultados indican que las aguas de la ciudad de Puebla tienen calidad

CUADRO 41. CALIDAD AGRONOMICA DEL AGUA RESIDUAL PROCEDENTE DE SAN MARTIN TEXMELUCAN.

| | | | | | | | |
|------------------|------|------------------|------|-----------------|--------|-----------------|-------|
| Ca ⁺⁺ | | Mg ⁺⁺ | | Na ⁺ | | K ⁺ | |
| PPM | EPM | PPM | EPM | PPM | EPM | PPM | EPM |
| 77.68 | 3.87 | 24.60 | 2.02 | 130.50 | 5.68 | 257.26 | 4.2 |
| SO4 ⁻ | | CL ⁻ | | STO | | DUREZA | |
| PPM | EPM | PPM | EPM | PPM | CA | TOTAL | ALCAL |
| 129.20 | 3.52 | 150.30 | 4.24 | 816.96 | 193.77 | 295.02 | 211.0 |
| CO ₂ | RES | CLHO. RIESO | PH | TEMP | A.F. | CO ₃ | |
| 1705 | 3.35 | C 3 - S 1 | 7.90 | 22.0 | 0.00 | 0.00 | |

SE.=CONDUCTIVIDAD EFECTIVA Y SP.=SALINIDAD POTENCIAL EN EPM.

RS.= CARBONATO DE SODIO RESIDUAL EN EPM. Y PSP.= % POSIBLE DE NA

| | | | | |
|-----|------|------|------|-------|
| NO. | SE | SP | CRS | PSP |
| 1 | 7.70 | 6.00 | 0.00 | 73.13 |

CLASIFICACION ABREVIADA PARA EMPRESAS A CALIDAD DE AGUA CON BASE A LOS DATOS DEL ANALISIS QUIMICO.

- B SIGNIFICA QUE ES BUENA
- C SIGNIFICA QUE ES CONDICIONADA
- N SIGNIFICA QUE ES NO RECOMENDABLE

RECOMENDACION QUE EL AGUA ES CONDICIONADA O NO RECOMENDABLE AL TAMBIEEN SE COMPLEMENTA UTILIZANDO LOS FACTORES CRITICOS ASIGNADO CON LA SIGUIENTE CLAVE :

- I.=CON RESPECTO A SALES SOLUBLES
- II.=CON RESPECTO AL SODIO
- I.A MEDIDAS CON LA CE.
- II.A MEDIDAS CON LA RES.
- I.B MEDIDAS CON LA SE.
- II.B MEDIDAS CON EL CRS.
- I.C MEDIDAS CON LA SP.
- II.C MEDIDAS CON EL PSP.
- III. CON RESPECTO A TOXICOLOGIA (CL).

| | |
|-------|---------|
| NO. 1 | C/I.B |
| NO. 1 | C/II.C |
| NO. 1 | C/III.C |
| NO. 1 | C/III |

CUADRO 42. CALIDAD AGRONOMICA DEL AGUA RESIDUAL PROCEDENTE DE PUEBLA.

| Li ⁺⁺ | | Mg ⁺⁺ | | NH ⁺ | | HCO ₃ ⁻ | |
|------------------------------|-------|------------------|------|-----------------|--------|-------------------------------|-------|
| PPM | EPM | PPM | EPM | PPM | EPM | PPM | EPM |
| 186.40 | 5.31 | 35.80 | 2.94 | 206.50 | 8.98 | 303.79 | 4.9 |
| SO ₄ ⁼ | | CL ⁻ | | STO | DUREZA | | ALCAL |
| PPM | EPM | PPM | EPM | PPM | CA | TOTAL | |
| 269.20 | 5.60 | 266.30 | 7.51 | 1195.49 | 265.68 | 413.03 | 249. |
| C.E | RS | CLAS. RIEGO | PH | TEMP | A.F. | CO ₃ | |
| 1937 | 4.422 | C 3 - S 1 | 7.50 | 22.0 | 0.00 | 0.00 | |

DE.=SALINIDAD EFECTIVA Y SP.=SALINIDAD POTENCIAL EN EPM.

RS.= RESIDUO DE SODIO RESIDUAL EN EPM. Y PSP.= % POSIBLE DE NA.

| NO. | SE | SP | CRS | PSP |
|-----|-------|-------|------|-------|
| 1 | 12.79 | 10.31 | 0.00 | 70.25 |

NOTACION ABREVIADA PARA EXPRESAR LA CALIDAD DE AGUA CON BASE A LOS DATOS DEL ANALISIS QUIMICO.

- B SIGNIFICA QUE ES BUENA
- C SIGNIFICA QUE ES CONDICIONADA
- N SIGNIFICA QUE ES NO RECOMENDABLE

RA LOS CASOS QUE EL AGUA ES CONDICIONADA O NO RECOMENDABLE NOTACION SE COMPLEMENTA UTILIZANDO LOS FACTORES CRITICOS ACUERDO CON LA SIGUIENTE CLAVE :

- I.-CON RESPECTO A SALES SOLUBLES
 - I.A MEDIDAS CON LA CE.
 - I.B MEDIDAS CON LA SE.
 - I.C MEDIDAS CON LA SP.
- II.-CON RESPECTO AL SODIO
 - II.A MEDIDAS CON LA RAEI.
 - II.B MEDIDAS CON EL CR.
 - II.C MEDIDAS CON EL PCR.

III. CON RESPECTO A TOXICOS (CL).

| | |
|-------|--------|
| NO. 1 | C/I.B |
| NO. 1 | C/II.C |
| NO. 1 | C/III |
| NO. 1 | N/III |
| NO. 1 | C/II.A |

agronómica no recomendable para: salinidad efectiva, salinidad potencial y cloruros.

Esto se debe principalmente a las aportaciones de descargas industriales, lo que implica necesariamente un control en el riego con agua residual que puede incluir sistemas de acondicionamiento. Asimismo, su calidad es condicionada, con respecto a salinidad efectiva, conductividad eléctrica, porcentaje de sodio posible y salinidad potencial. Además, es no recomendable con respecto a cloruros.

En San Martín Texmelucan, la calidad de las aguas residuales es condicionada con respecto a: salinidad efectiva, conductividad eléctrica, cloruros y salinidad potencial.

Con respecto a la calidad sanitaria se procedió a la identificación de las industrias aportadoras de tóxicos y de acuerdo con la caracterización teórica del efluente de cada industria y el dato real de gasto de agua residual se cuantificaron los tóxicos potenciales (ref. 40).

6.1.2 Caracterización del Distrito de Riego

DISTRITO DE RIEGO

NOMBRE: 30 - Valsequillo, Pue.

LOCALIZACION GEOGRAFICA: Lat. Norte 18°24', 18°54', Long. Oeste 98°15', 98°38'

VOLUMEN DE AGUA UTILIZADO Mm³/AÑO: 180.0

CLIMA: Subhúmedo

PERIODO: CICLO AGRICOLA 1977-78

SUPERFICIE REGABLE (Ha): 33 784

CULTIVOS PREDOMINANTES: Maíz, alfalfa, frijol, chile.

INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA DISPONIBLE

| <u>PRESAS:</u> | <u>CAP. UTIL (Mm3/año)</u> | <u>CUENCA (KM2)</u> |
|------------------|----------------------------|---------------------|
| M. Avila Camacho | 393 | 7 067 |
| TOTALES | 393 | 7 067 |

| <u>CANALES:</u> | <u>LONGITUD (Km)</u> | <u>CAPACIDAD CONDUCCION (m3/seg)</u> |
|-----------------|----------------------|--------------------------------------|
| Principales | 105.0 | 50.0 |
| TOTALES | 105.0 | 50.0 |

| <u>DRENES:</u> | <u>LONGITUD (Km)</u> | <u>CAPACIDAD CONDUCCION (m3/seg)</u> |
|----------------|----------------------|--------------------------------------|
| Principales | 207.0 | 70.0 |
| TOTALES | 207.0 | 70.0 |

EXISTENCIA DE ACUIFEROS Y USO: Pozos profundos, uso agropecuario.

AGUA RESIDUAL DISPONIBLE

| <u>CIUDAD</u> | <u>VOLUMEN 1981 (Mm3/año)</u> | | <u>TOTAL</u> |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------|
| | <u>DOMESTICO</u> | <u>INDUSTRIAL</u> | |
| Puebla, Pue. | 60.2 | 38.5 | 98.7 |
| San Martín Texme lucan, Pue. | 1.0 | 4.4 | 5.4 |
| TOTAL | 61.2 | 42.9 | 104.1 |

CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL

CALIDAD SANITARIA

| <u>PARAMETRO</u> | <u>CLASIFICACION</u> | <u>AFECTACION</u> |
|--------------------|---------------------------------|--|
| Coliformes Totales | No recomendable | Riesgos de salud pública |
| Tóxicos | (4.3×10^5 NMP/100 ml) | |
| Cd, CN, Cr | Condicionada | Salud pública, suelos, - cultivos y vida acuática |
| Hg | No recomendable | Salud pública y vida acuá- tica. |

CALIDAD AGRONOMICA

| <u>PARAMETRO</u> | <u>CLASIFICACION</u> | <u>AFECTACION</u> |
|----------------------|----------------------|--|
| Cloruros | No recomendable | Clorosis en cultivos (agua de Puebla) |
| Salinidad, sodicidad | Condicionada | Salinización y sodificación de suelos. |

TIPO DE SUELO

CLASIFICACION (FAO/UNESCO): E (Rendzina); Hh (Feozem Háptico)

TEXTURA (FAO/UNESCO): E, Limos; Hh Limos y Arcillas

PROPIEDADES HIDRODINAMICAS: E: drenaje interno bueno, permeabilidad moderada y rápida.

Hh: drenaje interno bueno, permeabilidad moderada buena infiltración de agua.

6.1.3 Análisis y Discusión

AGUA RESIDUAL

Criterios de Operación: De acuerdo con el tipo de suelo y características del agua residual es necesario controlar la aplicación de riego mediante láminas adecuadas y vigilar la salinidad, y el control de Mercurio en las fuentes de origen principalmente industriales; se recomienda profilaxis en la región rural.

Sistemas Operativos: En los vasos de almacenamiento se presenta remoción de Mercurio y cadmio a condiciones aceptables, por asimilación de malezas acuáticas; y no se presentan buenas remociones para cromo y cianuro. Existe "remociones de salinidad y sodicidad por almacenamiento de 126 días (tiempo de retención), los cloruros quedan condicionados para cultivos tolerantes.

Sistemas de Tratamiento: En caso de detección de microorganismos patógenos en productos forrajeros cosechados o si se quiere regar cultivos que se va-

Producto Cosechado: No colocarlo en el suelo y no permitir el pastoreo en los campos forrajeros hasta que estén completamente secos; en la alfalfa se recomienda el consumo en forma achicalada.

Dren Agrícola: Control de patógenos y metales pesados mediante monitoreo de las aguas de retorno agrícola.

Acuíferos: Monitoreo preventivo a los acuíferos en cuanto a microorganismos patógenos y tóxicos.

Suelos: Se recomienda períodos de secado de 3 a 5 días. (Ref. 29).

Sistemas Operativos: Control de presas de almacenamiento y canales de riego, control de eutroficación y azolvamiento en presas y comprobación de remoción mediante monitoreos.

OBSERVACIONES: El agua residual procedente de San Martín Texmelucan es la principal aportadora de elementos tóxicos, porque predomina el agua residual industrial.

Del estudio conjunto de caracterización, análisis y discusión anteriores se presentan las siguientes recomendaciones y diagnóstico sobre el uso de las aguas residuales en el Distrito de Riego 30 Valsequillo, Pue.

Es recomendable controlar cromo, cianuro, mercurio y cadmio en las fuentes de origen del agua residual, sobre todo la procedente de San Martín Texmelucan - que se debe a descargas industriales. La salinidad no presenta problemas pero es conveniente el monitoreo en suelos para no afectar sus buenas característi

cas de permeabilidad y drenaje. La prioridad del control de tóxicos se puede determinar por su monitoreo en los productos cosechados. La lámina de riego recomendable es de 0.65 m.

El diagnóstico del Uso del Agua Residual es:

- . Los tóxicos presentan riesgo
- . No hay problemas por salinidad
- . No existe riesgo de contaminación de acuíferos (Prof. 30 m)

7.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones y recomendaciones de este estudio se presentan divididas en dos tipos:

a) Conclusiones de carácter general; que son las obtenidas de la revisión de otros estudios que se mencionan en varios de los capítulos.

b) Conclusiones de carácter específico; que son las generadas por el autor en este trabajo.

a) Conclusiones derivadas de estudios revisados:

1. El uso del agua residual para riego de superficies agrícolas, en México es una práctica común y extensiva. El mayor aprovechamiento se tiene en la zona agrícola del valle del Mezquital, Hgo. alrededor de 50 000 ha, que utiliza el agua residual generada en el área metropolitana de la ciudad de México.
2. Además del aprovechamiento de las aguas residuales municipales en los valles del Mezquital y de México, que comprenden los distritos de riego 03, 88 y 100; hay otras zonas agrícolas aledañas a 56 ciudades del país, que aprovechan el agua residual de éstas para riego.
3. El riego con agua residual en la mayoría de los casos (77%), se realiza sin previo tratamiento o acondicionamiento y sin ningún control de calidad en los sistemas de operación y manejo.
4. Las descargas que reciben tratamiento (13 ciudades), generalmente involucran pequeños volúmenes y el tratamiento se realiza en lagunas de estabi

lización que son los más económicamente accesibles. Sin embargo, en general no hay supervisión de la calidad del agua ofrecida y el mantenimiento de las instalaciones es prácticamente nulo.

5. Los estudios sobre el aprovechamiento del agua residual para riego en México, se han concentrado principalmente al D.R. 03. Estos estudios indican que existen problemas de contaminación por:

- . Boro, metales pesados, agentes químicos y organismos patógenos en cantidades superiores a las permitidas por la legislación vigente. Esta situación implica riesgos en salud pública y medio ambiente (degradación de la calidad sanitaria).
- . Alteración al sistema agrícola; suelos y cultivos y principalmente por que incrementa la salinidad y la sodicidad e incorpora agentes tóxicos (calidad agronómica).
- . Contaminación de acuíferos.
- . Contaminación de cuerpos receptores para la descarga de las aguas de retorno del riego, principalmente por plaguicidas.

6. A pesar de los riesgos que implica el riego con agua residual, se han observado ciertos beneficios tangibles como son: el poder fertilizante del agua residual hace, en muchos casos, innecesario el requerimiento de fertilizantes químicos; el incremento de la productividad agrícola; el contar con una fuente segura de agua; y, el lograr un control de contaminación indirecto.

7. Ya que se cuenta con varios estudios sobre la zona del Mezquital, en el Estado de Hidalgo (D.R. 03), es necesario ampliar los estudios a

otras zonas, principalmente las zonas áridas, con población mayor de 10 000 habitantes y condiciones climáticas diversas.

8. No se tiene una evaluación certera sobre el riesgo epidemiológico del uso del agua residual, ni de la relación que existe entre la práctica de riego, manejo por parte del campesino, consumo de forrajes por el ganado y consumo humano de productos agrícolas y ganaderos, con la incidencia de enfermedades de origen hídrico.
9. No se cuenta con sistemas de monitoreo y control adecuados para garantizar un mejor funcionamiento del sistema agrícola aprovechando el riego con agua residual.
10. No se dispone en México de legislación específica que norme el aprovechamiento del agua residual para riego de superficies agrícolas.

b) Conclusiones generadas en el desarrollo de este trabajo:

1. El riego con aguas residuales puede ser factible siempre y cuando se observen ciertas prácticas que minimicen el riesgo a la salud pública y los efectos negativos en la productividad agrícola, esto implica el manejar un estricto control sanitario y agronómico, de acuerdo a normas fijadas para este uso.
2. Los principales riesgos generados por el aprovechamiento del agua residual son por microorganismos patógenos y agentes tóxicos en lo que se refiere a salud pública y de salinidad, sodicidad y agentes tóxicos, en lo referente a la afectación del sistema agrícola.
3. No se deben regar cultivos con aguas residuales, que se vayan a consumir crudos. Ciertos cultivos se podrán regar previo tratamiento mínimo pri-

mario y de desinfección de las aguas residuales.

4. Existen restricciones para el riego por inundación y evitar el riego por aspersión con agua residual cruda.
5. Los tipos de suelo más aptos para el riego con agua residual son los suelos francos, pero también son aceptables los arenosos y los intermedios entre arenosos y arcillosos.
6. No se debe efectuar pastoreo en los campos forrajeros que hayan sido regados con aguas residuales y no estén completamente secos.
7. Se recomienda dejar de regar una semana antes de la cosecha de cereales, herbáceos y frutales.
8. La sodificación del suelo disminuye la permeabilidad y se puede reducir mediante la adición de yeso y después lavado.
9. No se debe regar con aguas residuales en superficies agrícolas donde existan acuíferos con niveles freáticos menores de 3 metros o existan estratos rocosos en fisuras o estructura cárstica.
10. Se debe evitar la salinización del suelo, ya sea por lavados, control de drenes, materia orgánica o adición de químicos.
11. Deberán existir condiciones de profilaxis para la población rural que maneja el agua residual así como de sus familias.
12. Se recomienda una distancia mínima de 100 m entre las áreas de aplicación y las zonas pobladas.
13. Se deberá dar preferencia al cultivo de productos agrícolas tolerantes o semitolerantes de los contaminantes de las aguas residuales.

14. El control de tóxicos contaminantes debe ser efectuado en la fuente de origen, en las industrias responsables de la descarga, y en los hospitales, para los coliformes y patógenos.
15. Evitar las descargas no tratadas de industrias y de centros aportadores de contaminación biológica tales como hospitales, rastros, etc.
16. Para el aprovechamiento del agua residual en riego agrícola, se deben considerar las siguientes acciones para mejorar su calidad: observar si las condiciones de operación del sistema agua-suelo-cultivo pueden dar el uso con el menor riesgo; si no, se deberán tomar en cuenta los sistemas operativos; y, si tampoco estos dan las condiciones requeridas de calidad, se deberán considerar sistemas de tratamiento, como mínimo el tratamiento primario y desinfección de las aguas residuales.
17. Se deberán implantar los sistemas de monitoreo y de control adecuados: de parámetros sanitarios (coliformes, microorganismos patógenos y agentes tóxicos) y de parámetros agronómicos (salinidad, sodicidad y agentes tóxicos). Además, se deberán incluir: DBO, SST, SDT, conductividad eléctrica y nutrientes, con una periodicidad mínima de un mes. Los si tios de muestreo recomendables son: agua residual influente (en la fuente de descarga, puntos intermedios en la conducción y en la toma de riego), suelo, cultivo y producto cosechado; acuífero, dren agrícola, sistemas operativos y sistemas de tratamiento.
18. Para el control se deberá tomar en cuenta que los datos del monitoreo no rebasen los límites establecidos en las normas para cada parámetro; en caso contrario, se deberá adecuar ya sea el agua residual, suelo, cultivo, infraestructura hidráulica o dar tratamiento, para que el

manejo del agua residual se encuentre dentro de un control, que minimize el riesgo del aprovechamiento de esta agua.

Recomendaciones:

19. Para la interpolación del uso del agua residual a otras zonas agrícolas se tendrá que aplicar la metodología propuesta de acuerdo a los criterios sugeridos y se deberá operar conforme a la serie de controles estipulados en los capítulos correspondientes.
20. Deberá tenerse en cuenta que no todas las regiones tendrán la misma capacidad de irrigar con aguas residuales y que se presentarán variaciones por las condiciones del clima, suelos, cultivos, infraestructura hidráulica y calidad del agua residual.
21. Es necesario investigar experimentalmente los efectos de agua residual en suelos, cultivos, salud pública y medio ambiente en cada región que use o vaya usar aguas residuales, fijando las características de control para cada una de ellas.
22. Resultaría de gran utilidad, para conocer mejor los efectos del aprovechamiento de las aguas residuales en el riego de zonas agrícolas, el abrir una "zona piloto" (una hectárea) cercana a una población de tamaño mediano, 50 000 ó 10 000 habitantes, donde se pueden ejercer controles estrictos, que permitan investigar a fondo, las variables (epidemiología, biología y parámetros fisicoquímicos) que afectan el aprovechamiento de este recurso, en la producción agrícola.

REFERENCIAS

1. - Plan Nacional Hidráulico 1981. Anexo 7. Catálogo de Proyectos de abastecimiento de agua a ciudades e industrias. SARH, 1981.
2. SEEP E., "The use of sewage for irrigation. A literature review". Bureau of San. Eng., dept. Public Health. California 1971.
3. CUADRA MORENO, J. Uso del agua negra para riego en los valles de México y del Mezquital, Hgo. SRH, DGDR, Memorandum Técnico No. 252, México 1967.
4. - International Symposium, state of knowledge in land treatment of wastewater. Hanover, New Hampshire, U.S.A. 1978.
5. JANETTI DAVILA, J. Uso agrícola de las aguas negras. SRH, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México 1970.
6. - Estudio para programar el aprovechamiento de los efluentes del valle de México, CPNH, SARH, (Documento Interno) Volúmenes 1 y 2 y anexos, México 1981.
7. MASCAREÑO CASTRO, F. Estudio preliminar sobre contaminación de suelos y de la producción agrícola en el D.R. 03 por el uso de aguas negras de la ciudad de México. Tesis Escuela Nacional de Agricultura, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México 1974.
8. CANTU V., J. Prueba de adaptación y rendimiento de doce sorgos forrajeros regada con aguas negras en ciclo tardío en General Escobedo, N.L. Tesis Universidad de Nuevo León, Monterrey, México 1972.
9. DE DIOS HERNANDEZ, J.B. Producción de maíz forrajero regado con aguas negras en el D.R. 88 Chiconautla, México. Tesis Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México 1977.
10. ECHARTEA C., E. Prueba comparativa de adaptación y rendimiento de ocho variedades de remolacha forrajera regadas con aguas negras en General Escobedo, N.L. Tesis Universidad de Nuevo León, Monterrey, México 1972.
11. JUAREZ C., M. Efectos de los componentes de las aguas negras (Boro y ABS) en el desarrollo de la lechuga y del frijol bajo condiciones de invernadero. Escuela Nacional de Agricultura Chapingo México 1971.
12. - Reuso del agua en la agricultura, la industria, los municipios y en la recarga de acuíferos. Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica, Dirección de Control de la Contaminación del Agua, consta de cinco etapas, SRH, México 1974, 1975, 1976 y 1979.
13. - Monitoreo de la calidad del agua del sistema de drenaje de la ciudad de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. 2 Volúmenes, México 1979.

14. - Programa de utilización de las aguas negras y otras aguas considerando en conjunto los valles del Mezquital, Ixmiquilpan y el de México, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, SRH, México 1960.
15. CABALLERO J., P. Análisis de aguas negras del gran canal del desagüe de la ciudad de México, SRH, México 1971.
16. - Estudio de la calidad del agua en el embalse "Manuel Avila Camacho" y su influencia sobre el Distrito de Riego. Subprograma de Protección y Ordenación Ecológica del Estado de Puebla, CEEMAREN, SARH, México 1980.
17. GODINEZ ARREDONDO, E. Aprovechamiento de aguas residuales. Tesis de Maestría División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería México 1977.
18. PALACIOS V., E. Productividad, ingreso y eficiencia en el uso del agua en los distritos de riego en México. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México 1975.
19. AGUIRRE MARTINEZ, J. Reutilización de aguas residuales para propósitos agrícolas e industriales. Seminario Mexicano Israelí sobre manejo de recursos hidráulicos. México 1974.
20. BRYAN R., P. La interacción del agua de riego con agua subterránea y el río Tula en el valle del Mezquital. Informe Final. Sección de Hidrología Isotópica, CIEA, México.
21. ACOSTA L., E. y ORTA L., M.T. Calidad del agua en la cuenca del valle de México. Documento Interno, CPNH, SARH, México 1980.
22. ORTA L., M.T., TEJEDA G., C., AMEZQUITA, J.C. Reglamento para la utilización de descargas de aguas residuales. Informe preliminar. Documento Interno, CPNH, SARH, México 1981.
23. ZEPEDA O., et.al. Programa para el reuso de agua en México, Primera y Segunda Etapas y Anexos. Documento Interno, CPNH, SARH, México 1982.
24. CUELLAR CHAVEZ, R. Criterios de calidad para el reuso de aguas residuales en riego agrícola. Segundo Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Monterrey, N.L. México 1980.
25. CONTIÑO ALVARADO, M. Evaluación bacteriana en vegetales irrigados con agua negra en la zona de San Gregorio Xochimilco. Tesis U.N.A.M. México 1981.
26. - Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Personal técnico del laboratorio de salinidad de los E.U.A. Editorial Limusa, México 1976.
27. SULLIVAN J., G. and BATTEN W., J. Soils, their nature, classes distribution, uses and care. University of Alabama Press, U.S.A. 1970.
28. - Evaluación del Impacto Ambiental de transporte y uso de las aguas residuales del área metropolitana del valle de México en la agricultura. Eco-Ingeniería, S.A. para CPNH, SARH 1980.

29. SEOANEZ CALVO, M. Aprovechamiento y tratamientos agrarios de las aguas residuales urbanas. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid, España 1978.
30. PALACIOS V., O. y ACEVES E.N. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. Escuela Nacional de Agricultura, Colegio de Postgraduados. Serie de apuntes No. 15, Chapingo, México 1970.
31. RUDOLFS, W., et.al. Contamination of vegetables grown in polluted soil III fold studies on ascaries eggs. Sewage Ind. Wastes 1951.
32. LARKIN, E.P., et.al. Land application of sewage wastes: Potential for contamination of food stuffs and agricultural soils by veruses, bacterial pathogens and parasites. U.S. Army Corps of Engineers. CRREL, Hanover, N.H. 1978.
33. - Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas. Diario Oficial de la Federación. México 29 de marzo de 1973, 22 de diciembre de 1975.
34. - Estudios del uso y reuso del agua en el Distrito Federal. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, D.D.F. México 1978.
35. - Water Quality Criteria 1972, A report of the committee on water quality criteria. U.S. Department of commerce national technical information service (NTIS) U.S.A. 1972.
36. LUBIG, G.F. et.al. Effects of arsenic compounds of citrus plants in solution culture. Soil Scie 88 1959.
37. RESMUSSEN, G.K. and W.H., H. Effects of arsenic on the growth of pineapple and orange seedlings in sand and solution nutrient cultures. Citrus Ind 46(3) 1965.
38. KLINTWORTH, H. Quality requirements of water for agriculture. South Afr. Ind. Chemist. 6, 1952.
39. TEJEDA GONZALEZ, C. Caracterización de las aguas residuales para selección y diseño de plantas de tratamiento, CPNH, Documento Interno, SARH, México 1982.
40. ORTA LEDESMA, M.T. Cuantificación de tóxicos y microorganismos patógenos en agua residual procedente de centros urbanos-industriales, CPNH, Documento Interno, SARH, México 1982.
41. CHISLUM, D. Lead, arsenic and copper content of crops grown on lead arsenate treated and untreated soils. Canadian Journals of Plant Science 1972.
42. AOMINE, S. and Co. Retention of mercury by soils II adsorption of phenylmercurie acetate by soil colloids. Soil Science and Plant Nutrition 13 (16) 1967.

43. BARRY THOMAS and Co. Lead and cadmium content of some vegetable food-stuffs. *J. Sci. Fd. Agric.* 23, 1972.
44. PERTOLDI, G., MARLETTA and Co. Lead in grapes exposed to automobile exhaust gases. *J. Sci. Fd. Agric.* 24, 1973.
45. DILLING, W.J. Influence of lead on the germination of seeds. *Annals of Applied Biol. U.S.A.* 1966.
46. PREER, JAMES R. et.al. Factors affecting heavy metal contents of garden vegetables. *Environ Poll.* 1:95 (1980).
47. GREENBERG, A.E. and KUPKA, E. Tuberculosis transmission by wastewaters: a review. *Sewage Ind. Wastes U.S.A.* 1957.
48. GREENBERG, A.E. and DEAN B.H. The beef tapeworm, measly beef, and sewage: a review. *Sewage Ind. Wastes U.S.A.* 1958.
49. Mc KEDRICK JOHN. Compulsory reuse of water due to very strict water pollution control regulations in Salisbury, Rhodesia. *Proceedings Water Reuse Symposium* 1979.
50. Mc PHERSON, JAMES B. Land treatment of wastewater at Werribee, past, present and future. *Prog. Wat Tech* 1979.
51. JEPSON, A. and ROTH, W. Epizootiology of cysticercus bovis-resistence of the eggs of taenia saginata. *Rep. Int. Vet. Congr.* 14th. 1949, Vol. 2, U.S.A. 1952.
52. KATZENELSON, E. and TELCH B. Dispersion of enteric bacteria in the air as a result of sewage spray irrigation and treatment processes. *Water Poll. Control Fed.* 48, U.S.A. 1976.
53. BUCKMAN, H.O. y BRADY, N.C. *Naturaleza y propiedades de los suelos Montaner y Simon S.A. Barcelona, España* 1966.
54. BISWAS ASIT K. *Water Management for arid lands in developing countries* Volume 13, *Water Development Supply and Management.* Pergamon Press.
55. CAJUSTE, J. LENOM. *Química de suelos con un enfoque agrícola.* Colegio de Postgraduados, Chapingo, México 1977.
56. AGUILERA, C.M. y MARTINEZ, R.E. *Relaciones agua, planta, atmósfera.* 2a. Edición; Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México 1980.
57. HERRERA MARTINEZ, L. *Uso de las aguas residuales municipales en irrigación agrícola.* Tesis de Maestría. DEPMI, UNAM, México 1980.
58. - *Curso sobre la ciencia del suelo en la planeación y el desarrollo agropecuario, 4 tomos, Memorias (Documento Interno), CPNH, SARH* 1981.
59. - *Relación entre suelo-planta-agua.* Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Servicio de Conservación de Suelos. *Colección Ingeniería de Suelos. Manual de Ingeniería de Suelos, Sección 15 Riego.* Editorial Diana, México 1972.