



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**APROVECHAMIENTO DE LOS BIOSÓLIDOS DERIVADOS DE
LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
(PTAR) CON LA MAYOR PRODUCCIÓN DE LODOS EN MÉXICO,
COMO UNA PROPUESTA PARA SU DESTINO EN DISTRITOS DE
RIEGO**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

DIEGO ABONZA SOTRES

DIRECTOR DE TESIS

JOSÉ ANTONIO BARRIOS PÉREZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M. en I. María Rafaela Gutiérrez Lara

VOCAL: Dra. Luz María Lazcano Arriola

SECRETARIO: Dr. José Antonio Barrios Pérez

1er. SUPLENTE: Dra. Gema Luz Andraca García

2do. SUPLENTE: M. en I. Sergio Adrián García González

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

ASESOR DEL TEMA: Dr. José Antonio Barrios Pérez.

SUSTENTANTE (S): Diego Abonza Sotres.

DEDICATORIAS

A mis padres: Leonardo y Paloma.

Por el apoyo incondicional que me han brindado en todo momento y por el amor y cariño que he recibido desde haber nacido.

A mis familiares: A mi hermana Paloma, a mis abuelos Venancio y David

Por el apoyo que me han brindado, por las muestras de cariño y por sus atenciones que he recibido de su parte.

A mis amigos:

Que estuvieron conmigo tanto en los buenos como en los malos momentos, que conté con su apoyo y amistad y que ahora tienen un lugar especial en mi vida.

A la memoria de mi abuela María Teresa y mi abuela Francisca

Por el cuidado, la atención y el amor inmenso que me brindaron en todo momento, ahora tienen un lugar muy importante en mi vida y sus recuerdos permanecen en mí.

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor José Antonio Barrios Pérez por su dirección, apoyo y la confianza que me brindó para la elaboración de este proyecto, muchas gracias.

Al Instituto de Ingeniería por su aceptación dentro del Programa de Estudiantes y por el financiamiento que me otorgaron durante el desarrollo de esta tesis.

A mi jurado; M. en I. Rafaela Martínez Lara, Dra. Luz María Lazcano Arriola, Dr. José Antonio Barrios Pérez, Dra. Gema Luz Andraca García y M. en I. Sergio Adrián García González por su tiempo y por su valiosa aportación a mi tesis.

A mis padres Leonardo Abonza y Paloma Sotres por enseñarme siempre a ser responsable y perseverante y a mi hermana Paloma Abonza por su apoyo.

A mis familiares que estuvieron al pendiente de mí y me brindaron su apoyo.

A las personas que estuvieron directa o indirectamente involucradas en la realización de este trabajo.

Y a ti por leer esta tesis.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	11
2	OBJETIVO	12
3	HIPÓTESIS	12
4	ANTECEDENTES	13
4.1	TIPO DE LODOS	13
4.1.1	<i>Lodo primario</i>	13
4.1.2	<i>Lodo secundario</i>	14
4.1.3	<i>Lodo químico</i>	14
4.2	PRODUCCIÓN DE LODO	15
4.3	COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS	19
4.3.1	<i>Propiedades físicas</i>	20
4.3.2	<i>Propiedades químicas</i>	22
4.3.3	<i>Propiedades biológicas</i>	23
4.4	PROBLEMÁTICA	25
4.5	PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LODOS	25
4.6	LEGISLACIÓN	31
4.7	REÚSO Y DISPOSICIÓN DE LODOS	34
4.7.1	<i>Reúso de lodos en otros países</i>	35
5	METODOLOGIA	37
5.1	ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE LODOS EN MÉXICO	37
5.2	ANÁLISIS DE LA INFRAESTRUCTURA DE RIEGO EN MÉXICO	38
5.3	CALIDAD DE LOS BIOSÓLIDOS	38
5.4	CRITERIOS DE ADICIÓN DE BIOSÓLIDOS EN SUELO AGRÍCOLA	41
5.4.1	<i>Análisis de los cultivos para fijación de biosólidos</i>	41
5.5	COSTOS DE ACARREO	43
6	RESULTADOS	45
6.1	ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE LODOS EN MÉXICO	45
6.2	ANÁLISIS DE LA INFRAESTRUCTURA DE RIEGO EN MÉXICO	52
6.3	CALIDAD DE LOS BIOSÓLIDOS	59
6.3.1	<i>Lodos Primarios</i>	60
6.3.2	<i>Lodos Activados y Lodos de Filtros Biológicos</i>	60
6.3.3	<i>Lodos de procesos de tratamiento primario avanzado</i>	61
6.4	ANÁLISIS DE LOS CULTIVOS AGRÍCOLAS PARA LA FIJACIÓN DE BIOSÓLIDOS	62
6.5	RELACIÓN DE PTAR–DR POR ESTADOS	68
6.5.1	<i>Aguascalientes</i>	68
6.5.2	<i>Baja California Norte</i>	71
6.5.3	<i>Chihuahua</i>	73
6.5.4	<i>Ciudad de México</i>	78
6.5.5	<i>Coahuila</i>	80
6.5.6	<i>Colima</i>	83
6.5.7	<i>Estado de México</i>	86
6.5.8	<i>Guanajuato</i>	90
6.5.9	<i>Guerrero</i>	92
6.5.10	<i>Hidalgo</i>	95

6.5.11	<i>Jalisco</i>	98
6.5.12	<i>Michoacán</i>	103
6.5.13	<i>Nuevo León</i>	105
6.5.14	<i>Puebla</i>	111
6.5.15	<i>Sinaloa</i>	113
6.5.16	<i>San Luis Potosí</i>	116
6.5.17	<i>Tamaulipas</i>	119
6.5.18	<i>Veracruz</i>	125
6.6	ANÁLISIS DE COSTOS DE ACARREO.....	128
7	RESUMEN DE RESULTADOS	131
8	CONCLUSIONES	133
9	ANÁLISIS DE RESULTADOS	133
10	RECOMENDACIONES	134
11	REFERENCIAS	135
12	ANEXO I. DEFINICIONES	139
13	ANEXO II. FICHAS CON LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	142
13.1	PTAR ATOTONILCO DE TULA, TULA HIDALGO.	142
13.2	PTAR AGUA PRIETA, ZAPOPAN, JALISCO.....	143
13.3	PTAR DULCES NOMBRES, PESQUERÍA, NUEVO LEÓN	144
13.4	PTAR NORTE, GENERAL ESCOBEDO, NUEVO LEÓN	145
13.5	PTAR CERRO DE LA ESTRELLA, IZTAPALAPA, CDMX.....	147
13.6	PTAR SUR, CHIHUAHUA, CHIHUAHUA	148
13.7	PTAR LEÓN, LEÓN, GUANAJUATO	149
13.8	PTAR EL AHOGADO, TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA, JALISCO	150
13.9	PTAR SUR, CIUDAD JUÁREZ, CHIHUAHUA	151
13.10	PTAR CIUDAD DE AGUASCALIENTES, AGUASCALIENTES.....	152
13.11	PTAR NORESTE, APODACA, NUEVO LEÓN.....	153
13.12	PTAR TIERRA NEGRA, CIUDAD MADERO, TAMAULIPAS	156
13.13	PTAR PLAYA NORTE, VERACRUZ, VERACRUZ	157
13.14	PTAR CULIACÁN NORTE, CULIACÁN, SINALOA	158
13.15	PTAR NORTE, CIUDAD JUÁREZ, CHIHUAHUA	159
13.16	PTAR NUEVO LAREDO, NUEVO LAREDO, TAMAULIPAS	160
13.17	PTAR AGUAS BLANCAS, ACAPULCO, GUERRERO	161
13.18	PTAR TOLUCA NORTE, TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO.....	163
13.19	PTAR MORELIA, MORELIA, MICHOACÁN	164
13.20	PTAR PRINCIPAL, SALTILLO, COAHUILA.....	165
13.21	PTAR COLIMA VILLA DE JUÁREZ, ACATITLÁN, COLIMA.....	166
13.22	PTAR NORTE, CHIHUAHUA, CHIHUAHUA	167
13.23	PTAR SEAPAL NORTE II, PUERTO VALLARTA, JALISCO.....	168
13.24	PTAR PUEBLA SAN FRANCISCO, PUEBLA, PUEBLA.....	170
13.25	PTAR BINCACIONAL, TIJUANA, BAJA CALIFORNIA	171
13.26	PTAR TANQUE TENORIO, SAN LUIS POTOSÍ, SAN LUIS POTOSÍ.....	172
13.27	PTAR TOLUCA ORIENTE, TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO	173
13.28	PTAR LAGO DE TEXCOCO I, CHIMALHUACÁN, ESTADO DE MÉXICO.....	174

Lista de Figuras

Figura 1. Gráfica de producción de lodos (Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería de la UNAM).	16
Figura 2. Mapa de la producción de lodos por estado en la República Mexicana	19
Figura 3. Comparación de la producción de lodos mínima y máxima establecida por Metcalf & Eddy con la producción de lodos estimada por el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería de la UNAM.....	49
Figura 4. Producción de lodos residuales generados por las plantas de tratamiento con caudal superior a 1 m ³ /s por estado.....	52
Figura 5. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR al Distrito de Riego en el Estado de Aguascalientes.	70
Figura 6. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR al Distrito de Riego en el Estado de Baja California Norte.....	73
Figura 7. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Chihuahua.....	77
Figura 8. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de la Ciudad de México.....	80
Figura 9. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Coahuila.....	83
Figura 10. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Colima.....	85
Figura 11. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de México.....	89
Figura 12. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Guanajuato.....	92
Figura 13. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Guerrero.....	95
Figura 14. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Hidalgo.....	98
Figura 15. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Jalisco.....	102
Figura 16. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Morelia.	105
Figura 17. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Nuevo León.....	110
Figura 18. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Puebla.....	113
Figura 19. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Sinaloa.....	116
Figura 20. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de San Luis Potosí.....	119
Figura 21. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Tamaulipas.....	124
Figura 22. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Veracruz.....	127

Figura 23. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Atotonilco de Tula al DR003	142
Figura 24. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Agua Prieta al DR013	143
Figura 25. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Dulces Nombres al DR026	144
Figura 26. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Norte al DR004	146
Figura 27. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Cerro de la Estrella al DR088 ...	147
Figura 28. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Sur al DR005	148
Figura 29. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR León al DR011	149
Figura 30. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR El Ahogado al DR013	150
Figura 31. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Sur al DR009	151
Figura 32. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Cd. Aguascalientes al DR001 ...	152
Figura 33. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Noreste al DR031	155
Figura 34. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Tierra Negra al DR092A	156
Figura 35. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Playa Norte al DR035	157
Figura 36. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Culiacán Norte al DR010	158
Figura 37. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Norte al DR009	159
Figura 38. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Nuevo Laredo al DR050	160
Figura 39. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Aguas Blancas al DR105	162
Figura 40. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Toluca Norte al DR033	163
Figura 41. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Morelia al DR020	164
Figura 42. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Principal al DR017	165
Figura 43. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Colima-Villa de Juárez al DR053	166
Figura 44. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Norte al DR005	167
Figura 45. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR SEAPAL Norte II al DR105	169
Figura 46. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Puebla San Francisco al DR030	170
Figura 47. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Binacional al DR014	171
Figura 48. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Tanque Tenorio al DR049	172
Figura 49. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Toluca Oriente al DR033	173
Figura 50. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Lago de Texcoco I al DR088	174
Figura 51. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Reynosa I al DR025	175

Lista de Tablas

Tabla 1. Producción de lodos en algunos procesos y operaciones de tratamiento de lodos residuales	15
Tabla 2. Producción de lodos por Estados	17
Tabla 3. Microorganismos presentes en lodos residuales	23
Tabla 4. Procesos disponibles para el tratamiento de lodos	27
Tabla 5. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos	32
Tabla 6. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos	32
Tabla 7. Aprovechamiento de biosólidos	33
Tabla 8. Valor típico del contenido de nitrógeno orgánico y amoniacal de distintos tipos de lodos	40
Tabla 9. Precios de acarreo de materiales y renta de transporte	43
Tabla 10. Listado de PTAR cuya producción de lodos es constante y tienen una capacidad instalada superior a 1 m ³ /s	46
Tabla 11. Producción de lodos a partir de los parámetros establecidos por Metcalf & Eddy y con los resultados reportados por el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería	50

Tabla 12. Distritos de Riego cercanos a las PTAR seleccionadas.	53
Tabla 13. Contenido de Nitrógeno en lodos primarios.....	60
Tabla 14. Contenido de Nitrógeno en lodos activados y lodos de filtros biológicos.	61
Tabla 15. Contenido de Nitrógeno en lodos primarios avanzados.....	61
Tabla 16. Lista de los cultivos analizados para la aplicación de biosólidos en cada Distrito de Riego.	62
Tabla 17. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Aguascalientes.	69
Tabla 18. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Baja California Norte.....	72
Tabla 19. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Chihuahua.	75
Tabla 20. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de la Ciudad de México.	78
Tabla 21. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Coahuila.	81
Tabla 22. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Colima.	84
Tabla 23. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de México.	87
Tabla 24. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Guanajuato.	90
Tabla 25. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Guerrero.	93
Tabla 26. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Hidalgo.	96
Tabla 27. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Jalisco.	100
Tabla 28. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Michoacán.	103
Tabla 29. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Nuevo León.	107
Tabla 30. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Puebla.	111
Tabla 31. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Sinaloa.	114
Tabla 32. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Tamaulipas.	117
Tabla 33. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Tamaulipas.	121
Tabla 34. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Veracruz.	125
Tabla 35. Análisis económico del acarreo de biosólidos.	128
Tabla 36. Resultados finales del estudio.....	131
Tabla 37. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Atotonilco de Tula	142
Tabla 38. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Agua Prieta.....	143
Tabla 39. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Dulces Nombres	144
Tabla 40. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Norte.....	145
Tabla 41. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Cerro de la Estrella	147
Tabla 42. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Sur	148
Tabla 43. Ficha de resultados del análisis de la PTAR León.....	149

Tabla 44. Ficha de resultados del análisis de la PTAR El Ahogado	150
Tabla 45. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Sur	151
Tabla 46. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Cd. Aguascalientes	152
Tabla 47. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Noreste	153
Tabla 48. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Tierra Negra.....	156
Tabla 49. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Playa Norte	157
Tabla 50. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Culiacán Norte	158
Tabla 51. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Norte	159
Tabla 52. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Nuevo Laredo	160
Tabla 53. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Aguas Blancas	161
Tabla 54. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Toluca Norte	163
Tabla 55. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Toluca Morelia	164
Tabla 56. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Principal.....	165
Tabla 57. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Colima-Villa de Juárez	166
Tabla 58. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Chihuahua	167
Tabla 59. Ficha de resultados del análisis de la PTAR SEAPAL Norte II	168
Tabla 60. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Puebla San Francisco	170
Tabla 61. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Binacional	171
Tabla 62. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Tanque Tenorio	172
Tabla 63. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Toluca Oriente	173
Tabla 64. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Lago de Texcoco I	174
Tabla 65. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Reynosa I	175

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Nitrógeno disponible.....	40
Ecuación 2. Nitrógeno disponible anual para lodos primarios	40
Ecuación 3. Nitrógeno disponible anual para lodos activados y de filtros biológicos	40
Ecuación 4. Nitrógeno disponible anual para lodos primarios avanzados	41
Ecuación 5. Determinación de la tasa anual de los lodos	42
Ecuación 6. Lodos requeridos para fertilizar una superficie cultivada	42
Ecuación 7. Porcentaje de la superficie fertilizada anualmente	42
Ecuación 8. Determinación del lodo húmedo producido.....	44
Ecuación 9. Costos de acarreo de biosólidos en base a la distancia	44
Ecuación 10. Número de viajes para transportar los biosólidos	44
Ecuación 11. Costo anual de acarreo	45

1 INTRODUCCIÓN

Hasta el año 2015 hay registradas 2,477 plantas de tratamientos de aguas residuales municipales (PTAR) en México, las cuales trataron ese mismo año 120.9 m³/s de aguas residuales, cifra que equivale al 57.0% de los 212.0 m³/s que fueron recolectados en los sistemas de alcantarillado, de acuerdo con las Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2016).

El objetivo principal en los procesos de tratamiento de aguas residuales es la reducción o eliminación de los agentes contaminantes. A partir de tal labor se obtiene un subproducto que son los lodos, cuya generación resulta inevitable en cualquier tipo de tratamiento.

Los lodos residuales derivados del tratamiento de agua son producto de:

- La concentración de sólidos contenidos en el influente (lodos primarios)
- La generación de sólidos suspendidos (lodos activados) a partir de la materia sólida disuelta en el agua residual (Campos *et al.*, 2009).

El volumen de producción de los lodos residuales es un grave problema para los centros de población ya que su generación se ha incrementado a medida que se acelera el crecimiento demográfico (Delgado *et al.*, 2002). Para las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), por su parte, el tratamiento y disposición final de lodos representa hasta el 50% del costo de operación (Appels *et al.*, 2008).

A la fecha se desconoce la cantidad de lodos que se produce a lo largo del territorio nacional, sin embargo se puede hacer un cálculo aproximado de los lodos producidos basándose en el caudal de agua tratada diariamente (Ortiz *et al.*, 1995).

Pese a la problemática que representan los lodos se han propuesto, a escala internacional, alternativas para su aprovechamiento. Su utilización en la agricultura como fertilizantes se considera como la alternativa más benéfica ya que presentan

un alto contenido de materia orgánica y nutrientes tales como nitrógeno, fósforo y calcio que resultan esenciales para el desarrollo de las plantas. Sin embargo, una limitante para su aplicación en suelos agrícolas puede ser la presencia de metales pesados y agentes patógenos (Utria *et al.*, 2008). Es por ello que previo a su aplicación, los lodos deben ser sometidos a procesos cuyo propósito es aumentar su estabilidad y de esta manera cumplir con los criterios establecidos para su reutilización. A estos lodos que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y otras características adquiridas después de su estabilización son susceptibles de aprovechamiento se les conoce como biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

En diversos estudios se ha demostrado que el uso de biosólidos incrementa el rendimiento de los cultivos, además mejora las propiedades químicas, físicas, físico-químicas y biológicas de los suelos agrícolas (Utria *et al.*, 2008).

Considerando lo planteado anteriormente y los beneficios de carácter económico y ecológico que conlleva la aplicación de biosólidos en suelos de cultivo, este estudio propone reutilizar los biosólidos en la agricultura, tomándose en cuenta las plantas de tratamiento de mayor generación de lodo en el país (de más de 1m³/s). Se hará además el planteamiento de los criterios generales de aplicación que deben considerarse en los programas de reúso de biosólidos con el fin de fomentar una alternativa viable que promueva su adecuado aprovechamiento.

2 OBJETIVO

Proponer una alternativa factible para el aprovechamiento en distritos de riego de los biosólidos que se generan en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con mayor caudal en el país.

3 HIPÓTESIS

¿Los biosólidos que se generan en las plantas de tratamiento de agua residual de México se podrían aprovechar como fertilizantes en Distritos de Riego?

4 ANTECEDENTES

4.1 Tipo de lodos

Dentro de una PTAR se pueden generar distintos tipos de lodos, las propiedades de cada uno de ellos varían de acuerdo al tipo de planta y el método de tratamiento del que se produjeron. Dependiendo de su fuente, los lodos se conforman de materia fecal, fibras, limo, flóculos biológicos, desechos alimenticios, compuestos químicos orgánicos e inorgánicos, entre ellos, metales pesados y trazas (Turovskiy, 2006).

El lodo es considerado como lodo crudo cuando no ha sido tratado química o biológicamente para reducir los sólidos volátiles o patógenos. Generalmente los lodos residuales se clasifican como primarios, secundarios (biológicos) y químicos (Turovskiy, 2006) y son producto de tratamientos de agua residual primario, secundario y terciario, respectivamente. Tales procesos de tratamiento son continuación del anterior (Amuda, 2008).

4.1.1 Lodo primario

Gran parte de las PTAR emplean el proceso físico de sedimentación primaria con la finalidad de eliminar los sólidos sedimentables de las aguas residuales. En una planta típica con sedimentación primaria y equipada con un proceso de tratamiento secundario convencional de lodos activados, el peso seco de los sólidos del lodo primario es cerca del 50% por el total de sólidos del lodo. Los lodos primarios se caracterizan por tener una concentración de sólidos variable entre un 2 y 7% (Turovskiy, 2006). A diferencia de los lodos activados y químicos, los lodos primarios se deshidratan rápidamente de manera mecánica con pocos requerimientos de acondicionamiento (CONAGUA, 2007). Sin embargo, también son altamente putrescibles y generan olores desagradables cuando son almacenados sin tratamiento (Turovskiy, 2006).

4.1.2 Lodo secundario

También conocido como lodo biológico, se derivan de procesos tales como lodos activados, bioreactores de membrana, filtros percoladores y biodiscos. De las plantas con sedimentación primaria normalmente se obtiene un lodo biológico bastante puro debido a que las bacterias consumen el material orgánico soluble e insoluble en el sistema de tratamiento secundario. Las plantas que carecen de sedimentación primaria producen un lodo secundario con residuos tales como fibras y arena. El lodo biológico contiene además los sólidos que no fueron removidos durante la clarificación primaria. El lodo obtenido de procesos como lodos activados y de filtros percoladores posee concentraciones de sólidos totales bajas, de 0.4 a 1.5% y de 1 a 4% respectivamente (Turovskiy, 2006). Por ello resulta más difícil de desaguar y espesar que el lodo primario y la mayoría de los lodos químicos. Las características y cantidades de los lodos secundarios varían con las tasas metabólicas y de crecimiento de los microorganismos que contenga el lodo (CONAGUA, 2007).

4.1.3 Lodo químico

Las plantas de tratamiento de aguas residuales ocasionalmente ocupan productos químicos para precipitar y remover sustancias difíciles de eliminar, y en algunos casos, para mejorar la eliminación de sólidos suspendidos. Es por ello que estas instalaciones generan lodos químicos. Un uso típico es la remoción por precipitación de fósforo, que incluye el uso de químicos como cal, alumbre y licores de salmuera tales como cloruro ferroso, cloruro férrico, sulfato ferroso y sulfato férrico. Por otro lado, algunos químicos empleados en las aguas residuales provocan efectos secundarios no deseados como la depresión del pH o la alcalinidad, lo que implica además la adición de químicos alcalinos para ajustar dichos parámetros. Sin embargo, generalmente las plantas que aplican productos químicos a los efluentes secundarios cuentan con clarificadores secundarios y filtros terciarios para remover los precipitados químicos (Turovskiy, 2006).

Los productos químicos empleados en el tratamiento de agua incrementan considerablemente la generación de lodo. Por ello, su producción dependerá de los químicos utilizados y las tasas de adición (CONAGUA, 2007).

4.2 Producción de lodo

Para dimensionar los equipos y las unidades de procesamientos de lodo, tales como tanques de almacenamiento, deshidratadores, digestores, incineradores y bombas de lodos, es necesario determinar qué cantidades de lodo se producen en una PTAR (Turovskiy, 2006). De acuerdo con Metcalf & Eddy, la producción de lodos puede estimarse a partir de los datos de la Tabla 1:

Tabla 1. Producción de lodos en algunos procesos y operaciones de tratamiento de lodos residuales

Proceso de tratamiento		Sólidos secos (kg/m ³)	
		Rango	Típico
Sedimentación primaria		0.11 - 0.17	0.15
Lodos activados		0.07 - 0.1	0.08
Filtración por goteo		0.06 - 0.1	0.07
Aeración extendida		0.08 - 0.12	0.1
Lagunas aireadas		0.08 - 0.12	0.1
Primario avanzado*		0.156 – 0.315	0.235
Adición química a tanques primarios para remoción de fósforo	(350 - 500 mg/L)	240 - 400	300
	(800 - 1600 mg/L)	600 - 1300	800

*Valor tomado de Jiménez et al (1997)

Además, con base en datos del caudal de operación de 38 plantas de tratamiento de agua residual de México y su respectiva generación de lodo obtenidos por el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería de la UNAM se construyó una gráfica a partir de la cual también se puede estimar la producción de lodos en PTAR del país (Figura 1).

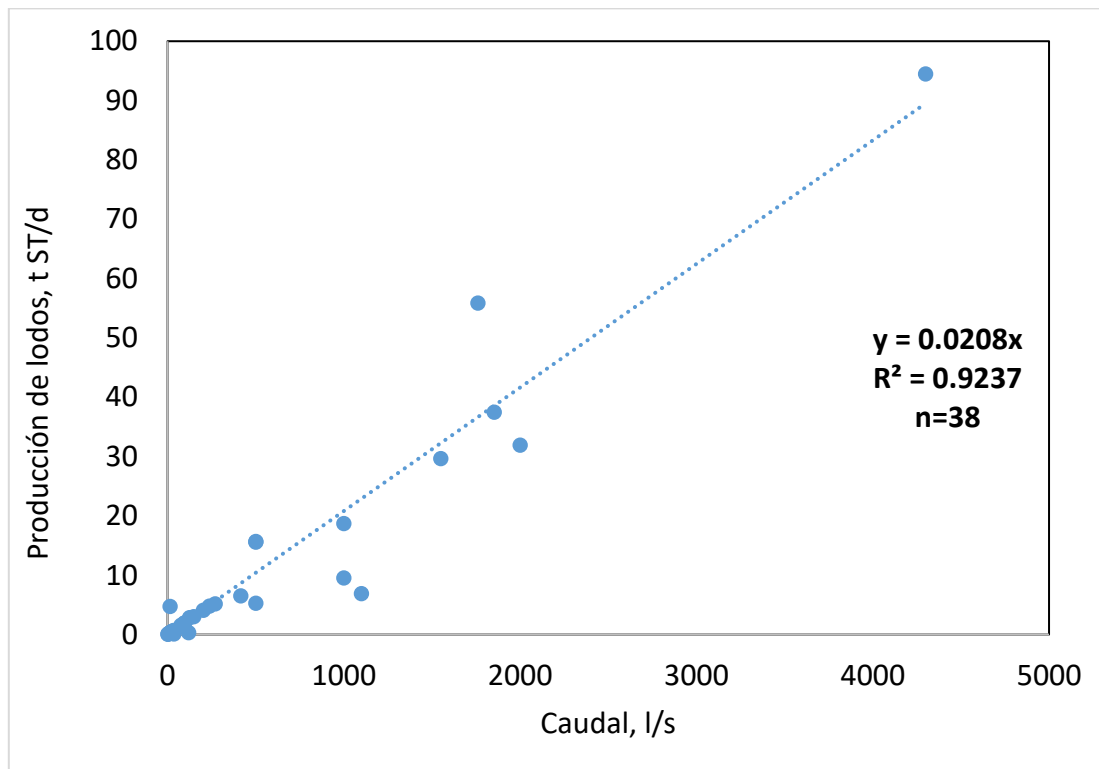


Figura 1. Gráfica de producción de lodos en PTAR en México (Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería de la UNAM).

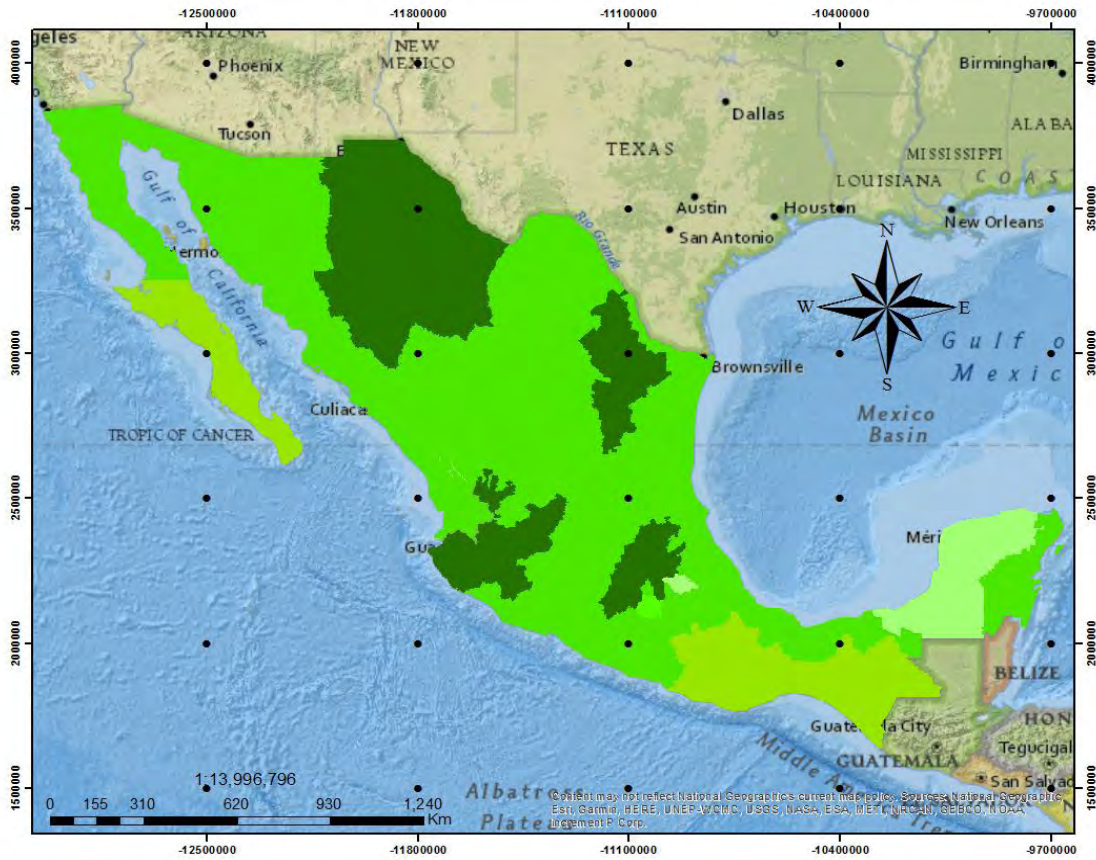
Con la gráfica de producción de lodos y partiendo del caudal tratado de cada Estado del país es posible hacer una estimación de las toneladas de lodos que son producidas anualmente, tal y como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Producción de lodos por Estados.

Estados	Caudal tratado (l/s)	Lodo generado (t ST/año)
Aguascalientes	2,253	17,106
Baja California Sur	5,480	41,603
Baja California	1,242	9,429
Campeche	153	1,160
Coahuila	4,499	34,156
Colima	1,614	12,254
Chiapas	918	6,972
Chihuahua	7,027	53,353
Distrito Federal	3,178	24,127
Durango	3,493	26,521
Guanajuato	5,450	41,379
Guerrero	3,721	28,250
Hidalgo	9,441	71,677
Jalisco	11,703	88,853
Estado de México	7,593	57,650
Michoacán	3,342	25,375
Morelos	1,537	11,673
Nayarit	2,506	19,028
Nuevo León	11,231	85,263
Oaxaca	1,005	7,631
Puebla	3,532	26,817
Querétaro	1,732	13,149
Quintana Roo	1,774	13,470
San Luis Potosí	2,143	16,272
Sinaloa	5,360	40,696
Sonora	3,651	27,717
Tabasco	1,765	13,403

Estados	Caudal tratado (l/s)	Lodo generado (t ST/año)
Tamaulipas	5,392	40,937
Tlaxcala	614	4,658
Veracruz	5,754	43,687
Yucatán	184	1,395
Zacatecas	1,611	12,229

La cantidad de lodos que se generan en la República Mexicana es considerable ya que el 65% de las entidades registran una producción estimada que supera las 10 mil toneladas de lodo seco por año, de las cuales destacan Jalisco, Nuevo León, Hidalgo, Estado de México y Chihuahua, entidades con producciones que superan incluso las 50 mil toneladas de lodo seco por año. En la Figura 2 se muestra un mapa que clasifica por estado la producción de lodos de acuerdo a la cantidad.



	De 50,000 a 100,000 $\frac{t ST}{año}$
	De 10,000 a 50,000 $\frac{t ST}{año}$
	De 5,000 a 10,000 $\frac{t ST}{año}$
	De 1,000 a 5,000 $\frac{t ST}{año}$

Figura 2. Mapa de la producción de lodos por estado en la República Mexicana

4.3 Composición y características

La composición de los lodos residuales está en función de las descargas que ingresan en las PTAR.

Normalmente los lodos residuales tienen un contenido de sólidos totales de entre el 2 y 12%, sin embargo el contenido de sólidos totales dependerá del tipo de lodo residual, sea primario, secundario o químico (EPA, 1995).

De igual manera, las características de los biosólidos dependen en gran medida del tipo de tratamiento que se aplica a los lodos residuales. Dichas características permiten definir el destino final de estos biosólidos y se clasifican de la siguiente manera:

4.3.1 Propiedades físicas

Una característica física importante en el lodo residual es su contenido de sólidos, pues ésta determina su método de aplicación sobre la tierra al ser tratado como biosólido (Epstein, 2003). El objetivo principal en el espesamiento o deshidratación del lodo es disminuir su volumen con la eliminación de agua, lo que aumenta su concentración de sólidos; con ello se reducen los costos asociados a su almacenamiento, tratamiento y transporte. El contenido total de sólidos del lodo residual se compone por material flotante, material sedimentable, material coloidal y material en solución (Vesilind, 2001).

Otras características físicas importantes son:

- La densidad y el tamaño de partícula: Estas características son importantes para conocer el comportamiento de la sedimentación del lodo residual, ya que influyen sobre sus propiedades centrifugas. La densidad de los sólidos del lodo se puede estimar, sabiendo que la densidad de sólidos inorgánicos es de 2.3 g/cm^3 y de los sólidos orgánicos es de 1 g/cm^3 . Hacer una medición de la densidad de las partículas del lodo es una labor difícil. Por otra parte el tamaño de partícula de los lodos se puede determinar por tres procedimientos; examen directo, fraccionamiento y conteo. Sin embargo cada uno de estas técnicas implica modificaciones del lodo lo que alteraría la distribución original, de modo que no es posible definir un tamaño de partícula específico.
- Distribución del agua: En una muestra de lodo residual se distinguen cuatro tipos distintos de agua de acuerdo a sus enlaces con las partículas del lodo, estos son: a) agua libre, no está unida a las

partículas y representa la mayor parte de los lodos residuales (70-75%). Fluye libremente sobre las partículas del lodo sin ser absorbida o unirse a ellas, no es influida por las fuerzas capilares y puede separarse por gravedad, b) agua intersticial, está unida por fuerzas capilares entre el flóculo del lodo. No se puede separar de lodo por gravedad y requiere ser separada por medios mecánicos (fuerzas centrífugas o filtración), c) agua de superficie, cubre toda la superficie de las partículas de lodo en varias capas de moléculas de agua, está unida por fuerzas adhesivas y absorbentes a las partículas del lodo y no puede moverse libremente d) agua intracelular, se encuentra contenida en las células, está químicamente unida en exopolímeros y se considera parte del agua de superficie. Se puede eliminar mediante procesos térmicos.

- Reología y viscosidad: La reología de un lodo es una característica que permite predecir y estimar su comportamiento cuando es transportado, manipulado, desechado o sometido a tratamiento, además influye en la selección del equipo y procedimiento adecuado a utilizar. La viscosidad del lodo residual está en función de la temperatura, la distribución del tamaño de partícula, las sustancias exopoliméricas y el contenido de sólidos. Así, el lodo es considerado como un fluido no Newtoniano ya que su velocidad de cizallamiento no es directamente proporcional al esfuerzo de corte. Medir la viscosidad del lodo es importante para dimensionar bombas o definir la demanda de polímeros. El lodo con un contenido de sólidos de 2-4% se comporta como agua, mientras que el lodo con un contenido de sólidos de 10% no puede ser bombeado.
- Valor calorífico: El valor calorífico (VC) de los lodos está en función de la humedad y de su composición. Los lodos que contienen grandes fracciones de combustibles, tales como grasa y escoria tienen un VC alto, mientras que los lodos con alto contenido en arena o precipitados químicos tienen un VC bajo.

4.3.2 Propiedades químicas

Las propiedades químicas de los biosólidos están afectadas por distintos factores (Epstein, 2003):

- Calidad del agua tratada.
- Nivel del tratamiento del agua: sea tratamiento primario, secundario o terciario.
- Modalidad del proceso: uso de químicos (sales metálicas, polímeros, etc.).
- Métodos de estabilización.

Los parámetros para la caracterización química de los lodos residuales se definen en:

- pH: El pH en los lodos residuales es un factor que influye en la producción de cultivos, pues su aplicación a la tierra puede alterar el pH en el suelo e influir en la absorción de metales del suelo y las plantas (EPA, 1995). En la mayoría de los biosólidos el intervalo de pH está generalmente entre 7 y 8 (Epstein, 2003).
- Materia orgánica: Por su alto contenido de materia orgánica, el lodo residual se aprovecha como un acondicionador del suelo favoreciendo así sus propiedades, tales como la infiltración y la capacidad de retención de agua (EPA, 1995).
- Nutrientes: Los lodos y los biosólidos contienen nutrientes que son esenciales para el crecimiento de las plantas, tales como nitrógeno, fósforo y potasio. Los niveles en los que contengan estos nutrientes determinan su aplicación en suelos. Un alto nivel de nutrientes debido a la excesiva aplicación de lodo residual sobre la tierra puede provocar la contaminación por nitratos de aguas subterráneas y superficiales (EPA, 1995).
- Metales: Contienen una cantidad variable de metales, algunos de estos, a bajas concentraciones, los cuales son necesarios para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, a concentraciones elevadas resultan tóxicos para los seres humanos, animales y plantas. Para su aplicación en suelo se regula

el contenido de metales que pueden representar un riesgo para la salud y el ambiente (EPA, 1995).

- Productos químicos orgánicos sintéticos: Pueden estar presentes en su composición, derivados de desechos industriales, productos domésticos o pesticidas, sin embargo se presentan en bajas concentraciones y no representan una amenaza para la salud humana y el ambiente (EPA, 1995).

4.3.3 Propiedades biológicas

En el lodo residual se encuentran a menudo agentes patógenos que incluyen bacterias, protozoos, virus y huevos de helmintos los cuales pueden representar un riesgo a la salud y al ambiente al ser reutilizados en forma de biosólidos en caso de que no cumplan con las normas respectivas.

Los lodos residuales destinados a aplicaciones en suelos generalmente se estabilizan con procesos biológicos y químicos, con lo que se reduce en gran medida la presencia de agentes patógenos, además reducen el potencial de olor y con ello la atracción de vectores.

Los diferentes tipos de patógenos típicamente encontrados en lodos residuales se muestran en la Tabla 3 (EPA, 1995):

Tabla 3. Microorganismos patógenos presentes en lodos residuales.

Organismo	Enfermedad/síntomas
Bacterias	
<i>Salmonella sp.</i>	Salmonelosis, fiebre, tifoidea
<i>Shigella sp.</i>	Disentería
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis
<i>Escherechia coli</i>	Gastroenteritis
Virus Entéricos	
<i>Hepatitis A</i>	Hepatitis infecciosa

Organismo	Enfermedad/síntomas
<i>Norwalk</i>	Epidemia de gastroenteritis
<i>Retrovirus</i>	Gastroenteritis aguda con diarrea severa
<i>Enterovirus</i>	
<i>Polivirus</i>	Poliomielitis
<i>Coxsackievirus</i>	Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre, escalofríos, diarrea, etc.
<i>Echovirus</i>	Meningitis, parálisis, encefalitis, fiebres, escalofríos, diarrea, etc.
<i>Reovirus</i>	Infecciones respiratorias, gastroenteritis
<i>Astrovirus</i>	Epidemia de gastroenteritis
<i>Calcivirus</i>	Epidemia de gastroenteritis
Protozoos	
<i>Cryptosporidium</i>	Gastroenteritis
<i>Entamoeba histolytica</i>	Enteritis aguda
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis (incluyendo diarrea, dolor abdominal, pérdida de peso)
<i>Balantidium coli</i>	Diarrea y disentería
<i>Toxoplasma gondi</i>	Toxoplasmosis
Helmintos	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Desórdenes alimenticios y nutricionales, dolor abdominal, vómito, inquietud.
<i>Ascaris suum</i>	Síntomas tales como tos, dolor de pecho y fiebre
<i>Trichuris trichura</i>	Dolor abdominal, diarrea, anemia, pérdida de peso.
<i>Toxocara canis</i>	Fiebre, dolor abdominal, dolor muscular, síntomas neurológicos.

Organismo	Enfermedad/síntomas
<i>Taenia saginata</i>	Nerviosismo, insomnio, anorexia, dolor abdominal, desórdenes alimenticios
<i>Taenia stium</i>	Nerviosismo, insomnio, anorexia, dolor abdominal, desórdenes alimenticios
Necator americanos	Anquilostomiasis
Hymenolepis nana	Teniasis

4.4 Problemática

La problemática del manejo de lodos residuales está en función de la cantidad y la calidad de los lodos que se generan en México.

Por un lado, de acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento en México y con base en la generación de lodos en función del caudal (Figura 1), se estima que en el país se generan cerca de 2,500 toneladas diarias de lodo seco. No obstante, debe considerarse que algunas plantas de tratamiento generan menos lodos (p. ej. procesos anaerobios) o no generan lodos de manera continua (p. ej. lagunas de estabilización).

Por otro lado, el alto contenido de patógenos y huevos de parásitos en los lodos generados en algunas regiones del país incrementan el riesgo a la salud derivado de su posible reúso. Este es un factor que limita el tipo de proceso a utilizar para tratarlo, reduciendo las opciones a procesos con altas capacidades de desinfección (LeBlanc, 2007).

4.5 Procesos de tratamiento de lodos

Los objetivos principales de las líneas de tratamiento de lodos residuales son la reducción de su volumen, para minimizar los costos de manejo y transporte y conseguir su estabilización, esto es, reducir su actividad biológica y el contenido de microorganismos causantes de enfermedades (Dégremont, 1990). De esta manera se previene su vertido indiscriminado como un contaminante sobre un

ecosistema y se promueve su aprovechamiento en actividades tales como la agricultura o el mejoramiento de suelos (Amuda, 2008).

Hoy en día existe una extensa variedad de procesos para el tratamiento de lodos a escoger que incluso pueden combinarse en una unidad de operación multiproceso. La selección del tren de proceso adecuado se efectúa comparando los costos totales necesarios para lograr la calidad deseada y la ruta de manejo seleccionada. En la elección del tren de proceso influyen 5 parámetros del lodo, estos son (Oleszkiewicz, 2002):

- Contenido de sólidos totales
- Concentración de compuestos orgánicos peligrosos
- Contenido de agentes patógenos
- Disponibilidad de terrenos adecuados para su disposición
- Concentración de metales.

A continuación se presenta en la Tabla 4 un resumen de los procesos disponibles para el tratamiento de lodos (Oleszkiewicz, 2002):

Tabla 4. Procesos disponibles para el tratamiento de lodos.

Espesamiento	Acondicionamiento	Estabilización	Deshidratación	Secado	Desinfección	Usos y otro procesos en suelo
Gravedad	Inorgánico	Digestión Anaerobia	Filtros banda: tubo de flujo cruzado	Lechos de secado y lagunas	Pasteurización	Comercialización
Flotación	Orgánico	Digestión Aerobia	Electro-osmótica	Lechos de secado al vacío	Incineración	Suelos agrícolas
Centrifuga	Elutriación	Composteo: Aerobio y anaerobio	Electro-acústica	Secado agitado	Pirólisis y gasificación	Recuperación de materias primas
Tambor Giratorio	Incineración térmica, pre-pasteurización	Tratamiento alcalino	Centrífuga	Bio-secado	Radiación	Calor y combustible (petróleo)
	Congelación	Composteo alcalino	Filtros al vacío: banda, rotatorio	Secado térmico	Fijación química	Silvicultura
	Ultrasónico	Oxidación química	Filtro banda prensa BFP	Centrífuga	Encapsulación	Relleno sanitario
		Pasteurización de lodos activados	Filtro de prensa empotrada. Membrana FP	Secado (IR) BFP	Estabilización alcalina	Restauración de suelo
		Oxidación húmeda	Prensa de tornillo		Reacción alcalino-ácida	Monorelleno
			Bolsas de secado			
			Prensas			

A continuación se describen algunos de los principales procesos de tratamiento de lodos:

- Procesos de reducción de volumen: El lodo no tratado tiene un contenido típico del 97% al 99% de agua en peso, por ello son comunes los procesos de espesamiento, acondicionamiento y/o deshidratación en el tratamiento de lodos. Estos tienen como propósito mejorar la eficiencia de los procesos de tratamiento posteriores, reducir el volumen de almacenamiento y disminuir los costos de transporte.

i. Espesamiento.

Genera un producto ligeramente concentrado aunque conserva esencialmente las propiedades de un líquido. El espesamiento por gravedad es comúnmente aplicado sobre lodos municipales, los cuales, posteriormente, contienen entre un 5 y 6% de sólidos totales.

ii. Acondicionamiento.

Los procesos de acondicionamiento alteran las propiedades físicas de los sólidos del lodo para facilitar la liberación de agua en los procesos de deshidratación. El acondicionamiento químico es mayormente utilizado e implica la adición de polímeros o reactivos químicos inorgánicos (comúnmente cloruro férrico y cal) al lodo antes de la deshidratación.

iii. Deshidratación.

Este proceso remueve una cantidad considerable de agua de los lodos y usualmente se lleva a cabo con lodo acondicionado. Las instalaciones municipales más grandes emplean a menudo medios mecánicos para deshidratar los lodos. Los procesos de deshidratación mecánica, tales como filtros prensa, filtros banda, filtros de vacío y centrífugas, producen un lodo con un contenido de sólidos de entre el 20 y 45% en peso.

iv. Secado.

Los procesos de secado son empleados cuando se requiere una eliminación de agua mayor a la alcanzada en los procesos de deshidratación. El secado térmico se utiliza para lograr la eliminación casi completa del agua de los lodos y además da como resultado lodos con un bajo contenido de patógenos pero a un costo energético alto.

- Procesos de estabilización: Minimizan posteriores complicaciones derivadas de la biodegradación de materia orgánica en los lodos. La estabilización se lleva a cabo mediante procesos de tratamiento biológico o químico que en la mayoría de los casos conducen a la inactivación de organismos patógenos y virus.

i. Tratamiento biológico.

Reduce el contenido orgánico de los lodos por degradación biológica en condiciones controladas. El tratamiento biológico más utilizado es la digestión anaerobia pues se emplea para tratar alrededor del 70% de los lodos a nivel mundial (Tyagi and Lo, 2011). Consiste en contener los lodos en tanques donde se excluye el aire para que posteriormente los microorganismos anaerobios se alimenten de la materia orgánica, produciendo biogás rico en metano que es una alternativa limpia y renovable a los combustibles fósiles. El lodo digerido es un fertilizante con nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) así como materia orgánica. Contiene además oligoelementos y cantidades significativas de potasio (K) y magnesio (Mg).

La digestión aerobia consiste básicamente en airear el lodo en reactores abiertos, lo que implica la oxidación directa de la materia

orgánica con la producción de materia celular y la posterior oxidación de este material. Este proceso se emplea generalmente para tratar lodos a una concentración baja de sólidos.

El compostaje es otro tipo de tratamiento biológico de amplio uso que consiste en la adición de agentes de abultamiento, como paja, virutas de madera, aserrín o desechos verdes sobre el lodo para aumentar la porosidad y favorecer el intercambio de oxígeno de la mezcla, así el contenido de carbono aumenta y se equilibra con el de nitrógeno y esta mezcla alimenta a las bacterias, emitiendo calor y aumentando la temperatura. El compostaje mata a los agentes patógenos ya que no pueden resistir las altas temperaturas (<55°C) y otras condiciones durante el compostaje. El lodo resultante es rico en nutrientes y apto para mejorar el suelo.

ii. Tratamiento químico.

Crea condiciones que inhiban a los microorganismos para retardar la degradación de la materia orgánica y prevenir los olores. La estabilización con cal consiste en mezclar los lodos deshidratados con cal viva, lo que genera calor y eleva considerablemente el pH. Dichos efectos inactivan a los patógenos y reducen la generación de olores, aunque una parte del nitrógeno del lodo se pierde durante el proceso. El producto es un material valioso para la tierra ya que contiene fósforo y otros nutrientes.

- Procesos de desinfección: Algunos procesos de reducción de volumen y estabilización consiguen la inactivación de agentes patógenos, sin embargo, existen procesos específicos para este tratamiento tales como la radiación y la pasteurización. Estos últimos son procesos que reducen los patógenos por debajo de niveles detectables.

4.6 Legislación

La regulación de los lodos residuales tiene el propósito de cumplir con su adecuado manejo a fin de minimizar el daño que pueden provocar al ambiente y a la salud humana. A nivel mundial, en diversos países existe un marco jurídico en torno a su disposición final. Sin embargo las características de los biosólidos varían en cada región, es por ello que las políticas regionales establecen soluciones convenientes a sus necesidades y adaptables a la problemática local.

En los Estados Unidos el uso y eliminación de lodos residuales o biosólidos ha sido regulado desde 1993 por el Código de Regulaciones Federales 40 (40 CFR) Parte 503, conocido como Apartado 503. Tales lineamientos están basados en el riesgo que implica el uso de biosólidos y establecen los requisitos en su contenido de metales, microorganismos y la reducción de atracción de vectores. En función de estos parámetros, el apartado 503 ha dividido los biosólidos en clases A y B.

En México la NOM-004-SEMARNAT-2002 es la Norma Oficial Mexicana que, desde el 2002, establece los lineamientos para la calidad de los biosólidos, promoviendo su aprovechamiento o disposición en áreas controladas. La clasificación de biosólidos del Apartado 503 sirvió como base a la legislación mexicana que, de acuerdo con las características biológicas de los biosólidos, establece las clases A, B y C y se presentan sus características en la Tabla 5:

Tabla 5. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
		Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca
A	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 1 ^(a)
B	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2,000,000	Menor de 300	Menor de 35

^(a) Huevos de helmintos viables

NMP: número más probable

Además, teniendo en cuenta el contenido de metales, la NOM-004-SEMARNAT establece los tipos de lodo excelente y bueno (Tabla 6).

Tabla 6. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.

Contaminante (Determinados en forma total)	Excelentes (mg/kg en base seca)	Buenos (mg/kg en base seca)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Para su reutilización, los biosólidos deben cumplir las condiciones establecidas en las tablas 3 y 4; además, deben tener un contenido máximo de agua del 85%. En función de su clasificación, los usos que se le pueden dar a los biosólidos se mencionan a continuación (Tabla 7).

Tabla 7. Aprovechamiento de biosólidos.

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	-Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación -Los establecidos por clase B y C
Excelente o bueno	B	-Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación -Los establecidos para la clase C
Excelente o bueno	C	-Usos forestales -Mejoramientos de suelos -Usos agrícolas

A nivel mundial se consideran básicamente tres opciones de manejo de los biosólidos:

- a) Uso en la agricultura
- b) Uso en rellenos sanitarios
- c) Minimización a través de procesos térmicos

El uso agrícola es la opción más importante en países desarrollados. En países como Estados Unidos, Australia, Reino Unido y algunos otros de la Unión Europea prevalece la aplicación agrícola de los biosólidos. Otros países se enfocan en la incineración del biosólido para la recuperación de fósforo, tales como Alemania, Japón y Grecia.

4.7 Reúso y disposición de lodos

Los sistemas para el reúso se enfocan en el aprovechamiento benéfico como por ejemplo la aplicación al suelo agrícola, silvicultura, horticultura y forestal, parques y jardines o restauración.

Por otro lado la disposición de lodos residuales y biosólidos hacen mención al destino final que se les da; de tal manera que existen diferentes opciones (Epstein, 2003):

- Compostaje y aplicación al suelo
- Secado en caliente y aplicación al suelo
- Incineración
- Disposición en vertederos

La aplicación directa de los biosólidos a la tierra, ya sea en forma líquida o como semisólido, representa un beneficio para la agricultura. Previo a su aplicación, el biosólido debe ser sometido a procesos de estabilización parcial como digestión o estabilización alcalina. A partir de la digestión se obtiene un biosólido de clase B, mientras que en la estabilización alcalina puede obtenerse un biosólido clase A o B. De acuerdo a las regulaciones estos pueden ser aplicados al suelo (Epstein, 2003).

El uso del biosólido como fertilizante en la agricultura es la opción más atractiva pues se reciclan los nutrientes que lo constituyen y que son útiles desde el punto de vista agronómico. Además esta actividad representa otras ventajas tales como la reducción de la demanda de fertilizantes inorgánicos, mejora de la estructura del suelo, mejora de la productividad del suelo, mejora la retención de humedad y representa un beneficio económico (Robledo, 2012, Carbonell, 2009).

Es importante que los sistemas de producción de biosólido de uso agrícola aseguren un balance adecuado entre los nutrientes contenidos en el biosólido y los necesarios para un cultivo en particular. Esto con la finalidad de evitar efectos dañinos como la inducción del cultivo a deficiencias de macronutrientes o fitotoxicidad (Oberle, 1994).

4.7.1 Reúso de lodos en otros países

A continuación se hará mención de la disposición que se le da a los lodos en algunos países (LeBlanc, 2008):

- Australia y Nueva Zelanda:

En ambos países actualmente se producen cerca de 360,000 toneladas secas de biosólidos por año. Para las plantas de tratamiento de aguas, la gestión de lodos/biosólidos representa entre un 35 y 50% del capital total y del costo operativo.

La aplicación al suelo es el uso más común que se le asigna a los biosólidos, sin embargo cantidades sustanciales quedan almacenadas. Por su parte, la disposición en vertederos no está considerada como un uso beneficioso y no es aceptable en cualquier estado o territorio. La recuperación de energía (incineración) es considerada únicamente en la planta Lower Molonglo ubicada en el territorio capital de Australia.

- Canadá:

La Asociación de Biosólidos del Nordeste (NEBRA) estimó en el año 2004 que la producción de biosólidos en Canadá había alcanzado 7.2 millones de toneladas secas. De estas, el 49% se destinó a la aplicación a tierra, el 45% para usos no benéficos y eliminación y el 6% restante se destinaron a almacenamiento de largo plazo.

En Canadá los lodos no tratados de las aguas residuales pueden aplicarse directamente sobre la tierra (a veces bajo control provincial) o, como una alternativa decreciente, se envían a rellenos de tierra.

La eliminación de los lodos en vertederos o incineración son prácticas que generan gases de efecto invernadero y emisiones contaminantes de aire, situación que pretende ser mitigada aumentando su uso benéfico. Los biosólidos se utilizan en la fertilización forestal, reforestación y forestación para facilitar la producción de biomasa y el desarrollo del suelo, dos mecanismos para el secuestro de

carbono atmosférico. Como fertilizantes, los biosólidos han reducido la dependencia de fertilizantes químicos. Sin embargo, los usos de los biosólidos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y el secuestro de carbono atmosférico son tecnologías que aún no se reconocen en las políticas y programas ambientales federales o provinciales.

- Alemania

Actualmente existen en Alemania alrededor de 10,000 plantas de tratamiento de aguas residuales, de las cuales únicamente 250 tratan alrededor del 50% del volumen de aguas residuales. Cerca del 94% del volumen de aguas residuales producidas es tratada a un alto estándar que comprende un tratamiento biológico con eliminación de nutrientes. Desde el 2003 se tiene el registro de que en Alemania se producen aproximadamente 2 millones de toneladas de lodos secos al año.

En los últimos años los tratamientos térmicos y de incineración de lodos han tomado mayor importancia, en contraste con su disposición en vertederos o reúso en agricultura. A raíz de discusiones políticas, el reúso de lodos en la agricultura quedó prohibido.

- Japón

En Japón se generan más de 2 millones de toneladas de lodos secos por año, de los cuales aproximadamente el 70% son incinerados. Las recientes plantas de tratamiento de agua consideran el uso benéfico de los lodos, dicha tendencia ha ido en aumento. El reúso de lodos en la agricultura es de un 14% y se ha mantenido estable durante muchos años. Otras opciones de reúso son como material para la construcción, particularmente como insumo para la elaboración de cemento y se está impulsando el reúso de biogás generado en digestores anaerobios como combustible.

- Estados Unidos

De acuerdo a datos de la USEPA y de agencias reguladoras estatales en el 2004 se generaron 7,180, 000 toneladas de lodo seco, de las cuales el 55% se reutilizó en el suelo con propósitos agronómicos, silvícolas y de restauración de la tierra. El 45% restante fue eliminado en rellenos sanitarios municipales y por incineración. Otros usos que se le dan a los lodos incluyen el aprovechamiento de gas metano producido en los digestores como combustible, reúso de las cenizas de los incineradores de biosólidos como acondicionador de suelos, materia para elaborar cemento, asfalto y como material de relleno limpio.

5 METODOLOGIA

5.1 Análisis de la producción de lodos en México

La selección de las plantas de tratamiento de aguas residuales para este estudio se realizó a partir del Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación 2015 (CONAGUA, 2016).

Para este análisis se consideraron únicamente las plantas de tratamiento con una capacidad instalada superior a 1 m³/s ya que por lo general llevan un mejor control en el tratamiento de aguas y de lodos. Por otro lado se consideraron las plantas cuya producción de lodos sea de manera constante, de modo que las lagunas de estabilización no fueron tomadas en cuenta ya que este tipo de instalaciones por lo general se desazolvan después de varios años de operación.

A partir de los datos de la Tabla 1 se estimó una producción de lodos mínima y una producción de lodos máxima, considerando además un proceso de tratamiento de lodos tradicional, es decir una sedimentación primaria seguida de un tratamiento de lodos activados. Dichas gráficas se utilizaron para realizar una comparación con la gráfica obtenida por el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería de la UNAM con el fin de validarla y emplearla para las estimaciones de producción.

La estimación de las toneladas de lodos por día que producen las PTAR analizadas se hizo considerando los valores típicos de producción de lodos de la Tabla 1. Tales resultados se compararon con los estimados a partir de la ecuación de la recta de la Figura 1.

5.2 Análisis de la infraestructura de riego en México

Un Distrito de Riego (DR) se define como una porción geográfica cuya superficie es superior a las 2000 hectáreas y está conformado por: un conjunto de canales de riego, una o más fuentes comunes de abastecimiento de agua y de áreas de cultivo, las cuales se encuentran relativamente compactas. Cada distrito de riego implica además aspectos legales, administrativos, socioeconómicos y productivos importantes e interdependientes entre sí y cuentan con la supervisión permanente del Gobierno Federal a través de la CONAGUA (Pedroza, 2013). Hasta el año 2014 se tiene registro en México de 86 distritos de riego. En el periodo de 1970-2014 se registra un promedio de superficie cosechada anual bajo riego en los DR de 2.7 millones de hectáreas. En el periodo 2013-2014, los cultivos con la mayor superficie cosechada son el maíz grano, sorgo grano y trigo grano, los tres contribuyeron con un total de 1.71 millones de hectáreas, es decir el 58.6% del total de superficie cosechada en los DR (CONAGUA, 2015).

La identificación de los distritos de riego tomados en cuenta para este análisis se basó en las Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego del Año Agrícola 2013-2014 (CONAGUA, 2015). Estos se seleccionaron de acuerdo a su cercanía geográfica con las plantas de tratamiento y al mejor aprovechamiento posible que se le pueda dar a los biosólidos.

5.3 Calidad de los biosólidos

El contenido de nitrógeno de los biosólidos varía de manera considerable de acuerdo al tipo de tratamiento por el cual se generan en las PTAR. La US EPA establece que la tasa agronómica a la que se aplican los biosólidos debe calcularse para cultivos específicos, con base en el contenido de nitrógeno

disponible. Ello con el fin de minimizar la cantidad de nitrógeno que pueda lixiviar al agua subterránea.

Así, en terrenos con aplicación de biosólidos bajo requisitos del Apartado 503, el nitrógeno es el constituyente limitante sobre una base anual; es por ello que la tasa de aplicación se calcula teniendo en cuenta los tipos y cantidades de nitrógeno presentes en los biosólidos.

En los biosólidos el nitrógeno está presente en forma inorgánica ($\text{NO}_3\text{-N}$ y $\text{NH}_4\text{-H}$) y en forma orgánica (proteínas, quitinas, amino-azúcares y ácidos nucleicos). En las formas inorgánicas, el nitrógeno está disponible para los procesos de transformación del ciclo de nitrógeno en el suelo. Por su parte, el nitrógeno orgánico debe mineralizarse a las formas inorgánicas a través de su descomposición biológica en el suelo antes de que las plantas puedan asimilarlo. Por ello, conocer la tasa de mineralización del nitrógeno orgánico es sumamente importante. La conversión microbiana del nitrógeno orgánico a nitrógeno mineral se ve afectada por diversos factores del suelo, tales como la humedad, temperatura, aireación y pH. Además, las tasas de mineralización varían significativamente con el tipo de tratamiento al que se han sometido los biosólidos. Para biosólidos generados de tratamientos primarios y activados la tasa de mineralización estimada a un año de aplicación es del 40% (Girovich, 1996). De acuerdo con el Consejo Nacional de Investigación *et al.* (1996) el nitrógeno orgánico disponible para las plantas es la consideración principal en la adición de biosólidos al suelo. Coincide además que durante el primer año el 40% del nitrógeno orgánico se mineraliza y está disponible para las plantas. Por su parte, Andrews *et al.* (2007) menciona que la mineralización del nitrógeno orgánico procede de manera más rápida en las primeras semanas después de la aplicación del lodo que en el resto del año. En un periodo de 4 a 8 semanas después de la aplicación de lodos, la mineralización de N estará entre el 40% y 70% del total estimado para ese año.

La aplicación de los biosólidos al suelo agrícola se fijó a una base anual, considerando que durante este periodo de tiempo el 40% del nitrógeno orgánico

se mineralizaría a sus formas inorgánicas y estaría disponible para los cultivos. Información referente a la calidad de los lodos también se obtuvo de la literatura y se presenta en la Tabla 8. En el caso del lodo proveniente de filtros biológicos, el contenido de nitrógeno corresponde al de los lodos activados, ya que ambos son procesos biológicos.

Tabla 8. Valor típico del contenido de nitrógeno orgánico y amoniacal de distintos tipos de lodos.

Tipo de lodo	Nitrógeno amoniacal (kg/t)	Nitrógeno orgánico (kg/t)
Lodo activado	9.8*	36.4*
Lodo primario	5.7**	36.07**
Primario avanzado	0.82***	38.2***
Filtros biológicos	9.8*	36.4*

* (Díaz, 2004).

** (Rigby *et. al.*, 2015).

*** (Barrios *et. al.*, 2002).

A continuación se muestra la determinación del nitrógeno disponible anualmente de cada tipo de lodo residual.

Ecuación 1. Nitrógeno disponible

$$N_{disponible} = N_{mineral} + (Tasa\ de\ mineralización * N_{orgánico})$$

Ecuación 2. Nitrógeno disponible anual para lodos primarios

$$N_{disponible} = 5.7 \frac{kg}{t} + \left(0.4 * 36.07 \frac{kg}{t} \right) = 20.13 \frac{kg}{t}$$

Ecuación 3. Nitrógeno disponible anual para lodos activados y de filtros biológicos

$$N_{disponible} = 9.8 \frac{kg}{t} + \left(0.4 * 36.4 \frac{kg}{t} \right) = 24.36 \frac{kg}{t}$$

Ecuación 4. Nitrógeno disponible anual para lodos primarios avanzados

$$N_{disponible} = 0.82 \frac{kg}{t} + \left(0.4 * 38.2 \frac{kg}{t} \right) = 16.1 \frac{kg}{t}$$

5.4 Criterios de adición de biosólidos en suelo agrícola

A partir de la revisión bibliográfica se conocieron los aspectos más importantes que se deben considerar en la aplicación de biosólidos al suelo agrícola, basándose en criterios internacionales, tales como el Apartado 503 de la US EPA.

Las características del biosólido y el tipo de cultivo para el que se destine son los factores que fueron considerados para hacer un análisis de la aplicación del lodo a los cultivos. El cálculo de la tasa agronómica se basó en el nitrógeno (N) que requiere cada cultivo analizado, de esta manera se determinó la tasa de aplicación anual de biosólido.

Cabe mencionar que el Apartado 503 de la US EPA establece tasas máximas de aplicación de metales (en kg/ha) por año y de manera total, las cuales no deben ser excedidas para reducir los riesgos a la salud y al ambiente por esos elementos. En el presente trabajo, considerando que no existe suficiente información acerca del contenido de metales en los lodos de México, la tasa de aplicación de biosólidos considera únicamente el nitrógeno. Los datos proporcionados en este estudio deben por tanto ser evaluados caso por caso con base en la calidad de los biosólidos para no exceder los criterios mencionados.

5.4.1 Análisis de los cultivos para fijación de biosólidos

Una vez seleccionados los Distritos de Riego para este estudio se hizo un análisis de las especies vegetales cultivadas en cada uno de ellos, seleccionando así los principales cultivos para ser fertilizados. La información requerida de cada cultivo fue la siguiente:

- Superficie cultivada (ha)
- Requerimiento de N (kg/t)
- Rendimiento del cultivo (t/ha)

Posteriormente, fue posible conocer el requerimiento de nitrógeno en kilogramos por hectáreas de cultivo. Este dato junto con el nitrógeno disponible por año en los biosólidos, determinan una tasa de aplicación de lodo anual (Ecuación 5):

Ecuación 5. Determinación de la tasa anual de los lodos

$$Tasa\ anual\ de\ aplicacion\ de\ lodo\ \left(\frac{t}{ha * año}\right) = \frac{Requerimiento\ de\ N\ \left(\frac{kg}{ha * año}\right)}{N\ disponible\ \left(\frac{kg}{t}\right)}$$

Partiendo de la tasa anual de aplicación de lodos se puede determinar la cantidad de lodos requeridos para fertilizar la totalidad de la superficie sembrada del cultivo seleccionado (Ecuación 6), y a partir de ello estimar el porcentaje de superficie fertilizada durante un año (Ecuación 7):

Ecuación 6. Lodos requeridos para fertilizar una superficie cultivada

$$Lodos\ requeridos\ \left(\frac{t}{año}\right) = Superficie\ de\ cultivo\ (ha) * Tasa\ de\ aplicacion\ de\ lodo\ \left(\frac{t}{ha * año}\right)$$

Ecuación 7. Porcentaje de la superficie fertilizada anualmente

$$Porcentaje\ de\ superficie\ fertilizada = \frac{Lodos\ producidos\ \left(\frac{t}{año}\right)}{Lodos\ requeridos\ \left(\frac{t}{año}\right)}$$

Se realizó una relación considerando la ubicación de las PTAR así como de los Distritos de Riego cercanos a ellas para determinar la factibilidad de su aplicación agrícola. Los datos obtenidos con las ecuaciones anteriores se muestran en el Anexo 2.

Con ayuda del software ARCGIS se elaboraron mapas geográficos donde se señala la localización de las PTAR analizadas y de los distritos de riego cercanos a cada planta así como su respectivo porcentaje de superficie que puede ser

fertilizada y se trazaron las posibles rutas para transportar los lodos desde las PTAR hasta los distritos de riego.

5.5 Costos de acarreo

En lo que respecta a los costos para el acarreo de los biosólidos, influyen dos factores muy importantes; la distancia que se recorrerá de transporte y el volumen de lodos que se va a transportar. Los costos se incrementan considerablemente cuando la distancia a recorrer entre PTAR y Distrito de Riego es larga y también cuando la cantidad de lodos que se transporta es elevada. Como una referencia adicional, para este trabajo se consideró la renta de un medio de transporte adecuado para el acarreo de biosólidos.

A continuación se presentan los costos que se tomaron en cuenta para el análisis económico del acarreo de los biosólidos de cada PTAR a los respectivos Distritos de Riego (Tabla 9). Como unidad de transporte se seleccionó un camión de volteo modelo Mercedes Benz 1617/37 de 170 HP y con capacidad de transportar 7 metros cúbicos de material (Varela, 2013).

Tabla 9. Precios de acarreo de materiales y renta de transporte.

Acarreo por el primer kilómetro ($\$/m^3$)	\$ 19.25
Acarreo por los kilómetros subsecuentes ($\$/m^3/Km$)	\$ 7.54
Renta del transporte (Camión de volteo Mercedes Benz 1617/37; viaje)	\$ 462.66

Tras su tratamiento, se considera que los lodos se encuentran a una sequedad promedio de 30% de sólidos totales. Esto fue considerado para cada caso, además se asumió que una tonelada de lodo húmedo equivale a un metro cúbico de lodo húmedo, de esta manera se obtuvo un estimado del volumen anual de biosólidos que serán transportados (Ecuación 8).

Ecuación 8. Determinación del lodo húmedo producido

$$\frac{\text{Lodo producido } \frac{t ST}{\text{año}}}{0.3 \frac{t ST}{t LH}} = \text{Lodo producido } \frac{t LH}{\text{año}} * \frac{1 m^3 LH}{1 t LH} = \text{Lodo producido } \frac{m^3 LH}{\text{año}}$$

A partir de los mapas elaborados en el programa Arcgis, se calculó la distancia de cada una de las rutas trazadas entre las PTAR y los Distritos de Riego, esto calculando la geometría de la capas de las rutas, considerándolas como polilíneas y obteniendo así una distancia en kilómetros para cada caso.

Una vez determinados el volumen de lodos a transportar anualmente y la distancia de acarreo para cada caso de estudio, es posible estimar los costos.

Para cada ruta de acarreo propuesta se estimó un costo basado en la distancia a recorrer, a partir de la Ecuación 9.

Ecuación 9. Costos de acarreo de biosólidos en base a la distancia

$$\text{Costo por Distancia (\$)} = ((\$19.25) * (1 Km)) + ((\$7.54) * (\text{No. de Km subsecuentes}))$$

Posteriormente, se determinó un número de viajes mediante los cuales se considera sean los necesarios para transportar el biosólido producido anualmente en las PTAR a los Distritos de Riego, esto teniendo en consideración que la capacidad del medio de transporte es equivalente a 7 metros cúbicos (Ecuación 10).

Ecuación 10. Número de viajes para transportar los biosólidos

$$\text{Número de Viajes } \left(\frac{\text{viajes}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{Lodo húmedo anual producido } \frac{m^3}{\text{año}}}{7 \frac{m^3}{\text{viaje}}}$$

Con la consideración del costo de renta de transporte, se puede tener una idea del costo total de acarreo de los biosólidos para cada caso analizado. A partir de la Ecuación 11 se puede determinar el costo anual de acarreo.

Ecuación 11. Costo anual de acarreo

$$\text{Costo Anual de Acarreo} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = \text{No. Viajes} * (\text{Costo por Distancia} + \text{Costo por Renta})$$

6 RESULTADOS

6.1 Análisis de la producción de lodos en México

A partir de la revisión bibliográfica se seleccionó un total de 29 plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales cumplen con las características de tener una capacidad instalada mayor a 1 metro cúbico por segundo y tener una producción continua de lodos (Tabla 10). De este grupo de plantas, los lodos residuales se obtienen mayoritariamente del proceso de lodos activados, siendo 21 plantas las que emplean este tratamiento, 4 emplean procesos duales, 2 de tratamiento primario avanzado, 1 de tratamiento primario y 1 que emplea filtros biológicos. A continuación se especifican las plantas que utilizan un proceso dual (CONAGUA, 2016):

- PTAR Cd. Aguascalientes, Aguascalientes. Filtros biológicos – Lodos activados.
- PTAR Atotonilco de Tula, Hidalgo. Primario Avanzado – Lodos activados.
- PTAR Toluca Norte, Edo. Méx. Filtros biológicos – Lodos activados.
- PTAR Tanque Tenorio, SLP. Primario Avanzado – Lodos activados.

Tabla 10. Listado de PTAR cuya producción de lodos es constante y tienen una capacidad instalada superior a 1 m³/s.

Planta	Estado	Municipio	Cap. instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Proceso
Atotonilco de Tula	Hidalgo	Atotonilco de Tula	23,000	9,000	Dual
Agua Prieta	Jalisco	Zapopan	8,500	6,030	Lodos activados
El Ahogado	Jalisco	Tlajomulco de Zuñiga	2,280	2,100	Lodos activados
SEAPAL Norte II	Jalisco	Puerto Vallarta	1,125	890	Lodos activados
Dulces Nombres	Nuevo León	Pesquería	7,500	6,270.1	Lodos activados
Norte	Nuevo León	General Escobedo	3,000	2,394	Lodos activados
Noreste	Nuevo León	Apodaca	1,875	1,241.5	Lodos activados
Cerro de la Estrella	CDMX	Iztapalapa	3,000	2,190	Lodos activados
Chihuahua "Sur"	Chihuahua	Chihuahua	2,500	1,620	Lodos activados
"Sur" de Cd. Juárez	Chihuahua	Cd. Juárez	2,000	1,620	Lodos activados
"Norte" de Cd. Juárez	Chihuahua	Cd. Juárez	1,600	1,350	Lodos activados
Chihuahua "Norte"	Chihuahua	Chihuahua	1,200	430	Lodos activados
León	Guanajuato	León	2,500	1,526	Primario

Planta	Estado	Municipio	Cap. instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Proceso
Cd. Ags.	Aguascalientes	Ags.	2,000	954	Dual
Tierra Negra	Tamaulipas	Cd. Madero	1,800	1,200	Lodos activados
Nuevo Laredo	Tamaulipas	Nuevo Laredo	1,360	895	Lodos activados
Reynosa I	Tamaulipas	Reynosa	1,000	850	Lodos activados
Culiacán (Norte)	Sinaloa	Culiacán	1,700	1,533	Primario avanzado
Playa Norte	Veracruz	Veracruz	1,600	1,600	Filtros biológicos
Aguas Blancas	Guerrero	Acapulco de Juárez	1,350	1,350	Lodos activados
Binacional o Pitar	Baja California Norte	Tijuana	1,100	1,076.4	Lodos activados
Toluca Norte	Edo. México	Toluca de Lerdo	1,280	1,200	Dual
Toluca Oriente	Edo. México	Toluca de Lerdo	1,000	891	Lodos activados
Lago de Texcoco I	Edo. México	Chimalhuacán	1,000	800	Lodos activados
Morelia	Michoacán	Morelia	1,200	1,100	Lodos activados
Principal	Coahuila	Saltillo	1,200	900	Lodos activados
Colima - Villa de Álvarez	Colima	Colima	1,200	850	Lodos activados

Planta	Estado	Municipio	Cap. instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Proceso
Puebla San Francisco	Puebla	Puebla	1,100	1,292	Primario avanzado
Tanque Tenorio	SLP	SLP	1,050	1,000	Dual

La Figura 3 es una comparación de la gráfica obtenida por el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería de la UNAM con las gráficas de producción mínima y máxima de lodos a partir de los datos de Metcalf & Eddy de la Tabla 1. Se observa que la línea de tendencia para estimar la producción de lodos residuales en función del caudal obtenida por el grupo de investigación del Instituto de Ingeniería de la UNAM se encuentra dentro del rango reportado por Metcalf & Eddy.

Las estimaciones de las toneladas diarias de lodo residual que genera cada planta de tratamiento se muestran en la Tabla 11. De la comparación de los resultados obtenidos por ambos métodos para estimar la producción de lodos se concluye que la variación es mínima (menor a 5%), de modo que se valida lo reportado por el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería.

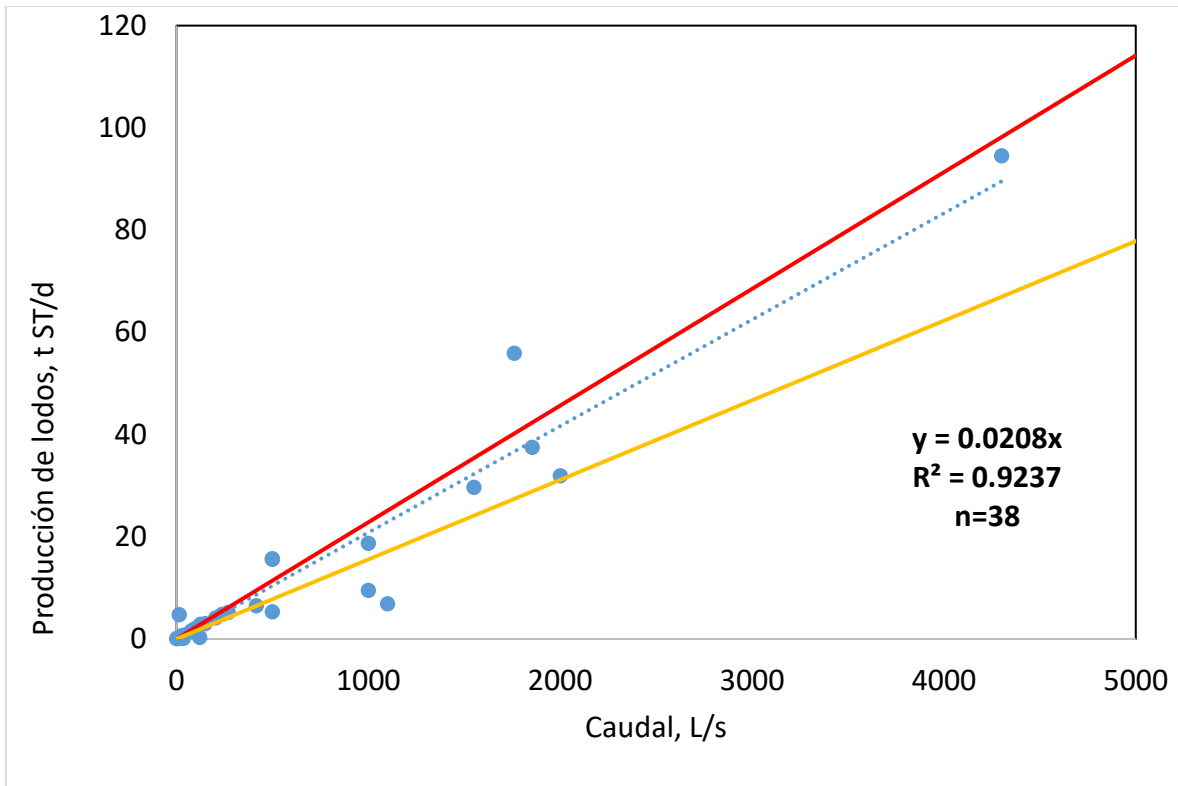


Figura 3. Comparación de la producción de lodos mínima y máxima establecida por Metcalf & Eddy con la producción de lodos estimada por el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Tabla 11. Producción de lodos a partir de los parámetros establecidos por Metcalf & Eddy y con los resultados reportados por el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería.

Planta	Caudal tratado (L/s)	Producción de lodo t ST/d (Con los parámetros establecidos por el Metcalf)	Producción de lodo t ST/d (Con la gráfica obtenida por el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería)
Atotonilco de Tula	9,000	178.8	187.2
Agua Prieta	6,030	119.8	125.4
Dulces Nombres	6,270.1	124.6	130.4
Norte de NL	2,394	47.6	49.8
Cerro de la Estrella	2,190	43.5	45.5
Chihuahua "Sur"	1,620	32.2	33.7
León	1,526	30.3	31.7
El Ahogado	2,100	41.7	43.7
Sur de Cd. Juárez	1,620	32.2	33.7
Cd. Aguascalientes	954	18.9	19.8
Noreste de NL	1,241.5	24.7	25.8
Tierra Negra	1,200	23.8	24.96
Culiacán (Norte)	1,533	31.1	31.9
Playa Norte	1,600	30.4	33.3

Planta	Caudal tratado (L/s)	Producción de lodo t ST/d (Con los parámetros establecidos por el Metcalf)	Producción de lodo t ST/d (Con la gráfica obtenida por el Grupo Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería)
Norte de Cd. Juárez	1,350	26.8	28.1
Nuevo Laredo	895	17.8	18.6
Aguas Blancas	1,350	26.8	28.1
Toluca Norte	1,200	23.8	24.96
Morelia	1,100	21.8	22.9
Principal	900	17.9	18.7
Colima - Villa de Álvarez	850	16.9	17.7
Norte de Chihuahua	430	8.5	8.9
SEAPAL Norte II	890	17.7	18.5
Puebla San Francisco	1,292	26.2	26.9
Binacional	1,076.4	21.4	22.4
Tanque Tenorio	1,000	19.9	20.8
Toluca Oriente	891	17.7	18.5
Lago de Texcoco I	800	15.9	16.6
Reynosa I	850	16.9	17.7

Como se muestra en la Figura 4 el estado con una mayor producción de lodos residuales, a partir de plantas con capacidad superior a 1 m³/s, es Nuevo León

con una producción diaria de 206 toneladas; le siguen Jalisco, Hidalgo, Chihuahua, Tamaulipas y el Estado de México con 187.6, 187.2, 95.5, 61.2 y 60.1 toneladas respectivamente.

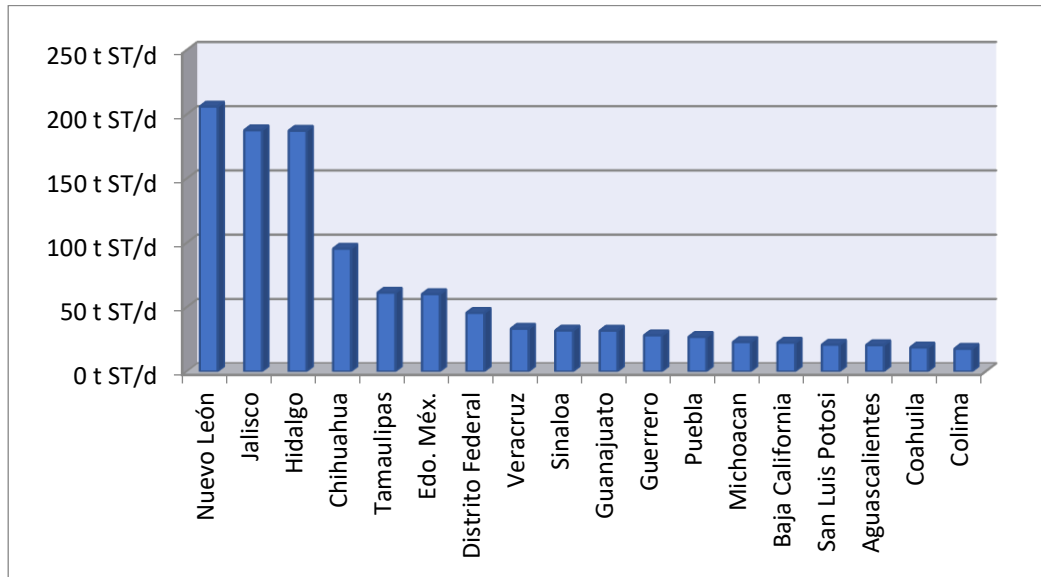


Figura 4. Producción de lodos residuales generados por las plantas de tratamiento con caudal superior a 1 m³/s por estado.

6.2 Análisis de la infraestructura de riego en México

Para el análisis de distribución de los biosólidos fueron seleccionados 24 Distritos de Riego. Como se ha mencionado anteriormente, la selección de cada uno de ellos se basó en la cercanía geográfica que tienen con las PTAR analizadas. En la

Tabla 12 se establecen los Distritos de Riego evaluados en este estudio (CONAGUA, 2015):

Tabla 12. Distritos de Riego cercanos a las PTAR seleccionadas.

Distritos de Riego	Cultivos Predominantes	Superficie de los Cultivos (ha)		Tipo del Cultivo
		Sembrada	Cosechada	
DR001 Pabellón	Maíz Grano	3,568	3,568	Riego (Primavera- Verano)
	Alfalfa*	702	702	Riego Perenne
DR003 Tula	Alfalfa*	25,415	25,415	Riego Perenne
	Maíz Grano	16,172	16,172	Riego (Primavera- Verano)
DR004 Don Martín	Trigo Grano	2,696	2,696	Riego (Otoño- Invierno)
	Sorgo Grano	2,617	2,617	Riego (Primavera- Verano)
	Zacate Verde	1,400	1,400	Riego Perenne
DR005 Delicias	Alfalfa*	21,572	21,572	Riego Perenne
	Nogal (Nuez)	8,302	8,302	Riego Perenne
	Cacahuete*	6,646	6,646	Riego (Primavera- Verano)

Distritos de Riego	Cultivos Predominantes	Superficie de los Cultivos (ha)		Tipo del Cultivo
		Sembrada	Cosechada	
DR009 Valle de Juárez	Algodón	4,709	4,709	Riego (Primavera-Verano)
	Alfalfa*	1,744	1,744	Riego Perenne
	Trigo Grano	1,440	1,440	Riego Otoño-Invierno
DR010 Culiacán-Humaya	Maíz Grano	107,201	105,468	Riego Otoño-Invierno
	Frijol (Alubia)*	29,260	29,117	Riego Otoño-Invierno
	Sorgo Grano	21,119	21,111	Riego Otoño-Invierno
DR011 Alto Río Lerma	Sorgo Grano	44,276	44,276	Riego Segundos Cultivos
	Cebada	36,523	36,523	Riego Otoño-Invierno
	Trigo Grano	22,278	22,278	Riego Otoño-Invierno

Distritos de Riego	Cultivos Predominantes	Superficie de los Cultivos (ha)		Tipo del Cultivo
		Sembrada	Cosechada	
DR013 Estado de Jalisco	Maíz Grano	25,565	25,565	Temporal Primavera-Verano
	Caña de Azúcar	8,113	8,113	Riego Perenne
DR014 Río Colorado	Trigo Grano	94,876	94,876	Riego Otoño-Invierno
	Algodón	32,040	32,040	Riego Primavera-Verano
	Alfalfa*	28,862	28,862	Riego Perenne
	Sorgo grano**	3,272	3,272	Riego Primavera-Verano
DR017 Región Lagunera	Sorgo Forraje Verde	13,816	13,816	Riego Primavera-Verano
	Algodón	12,654	12,654	Riego Primavera-Verano
	Nogal (Nuez)**	4,894	4,894	Riego Perennes
	Maíz Grano	7,469	7,469	Riego Primavera-Verano

Distritos de Riego	Cultivos Predominantes	Superficie de los Cultivos (ha)		Tipo del Cultivo
		Sembrada	Cosechada	
DR020 Morelia	Sorgo Grano	3,771	3,771	Riego Primavera-Verano
	Trigo Grano	2,265	2,265	Riego Otoño-Invierno
DR025 Bajo Río Bravo	Sorgo Grano	173,628	173,628	Riego Primavera-Verano
		11,598	11,598	Temporal Primavera-Verano
DR026 Bajo Río San Juan	Maíz Grano	36,589	36,589	Riego Primavera-Verano
	Sorgo Grano	29,500	29,500	Riego Primavera-Verano
DR030 Valsequillo	Maíz Grano	15,111	15,111	Riego Primavera-Verano
	Alfalfa*	3,873	3,873	Riego Perenne
DR031 Las Lajas	Sorgo Grano	1,189	1,189	Riego Primavera-Verano
	Zacate Verde	205	205	Riego Perenne

Distritos de Riego	Cultivos Predominantes	Superficie de los Cultivos (ha)		Tipo del Cultivo
		Sembrada	Cosechada	
	Zacate Verde	145	145	Riego Temporal
	Sorgo Forrajero Verde	142	142	Riego (Primavera-Verano)
	Soya Industrial	125	125	Riego (Primavera-Verano)
	Maíz Grano	123	123	Riego (Primavera-Verano)
DR033 Edo. Méx.	Maíz Grano	6,252	6,252	Riego Primavera-Verano
DR035 La Antigua	Caña de Azúcar	18,965	18,965	Riego Perenne
	Zacate Verde	1,533	1,533	Riego Perenne
DR049 Río Verde	Maíz Elotero	797	797	Riego Primavera-Verano
DR050 Acuña-Falcón	Zacate Verde	1,025	1,025	Riego Perenne
	Sorgo Forraje Verde	494	494	Riego Otoño-Invierno
DR053 Estado de Colima	Plátano	7,524	7,524	Riego Perenne
	Limón	4,550	4,550	Riego Perenne

Distritos de Riego	Cultivos Predominantes	Superficie de los Cultivos (ha)		Tipo del Cultivo
		Sembrada	Cosechada	
DR088 Chiconautla	Maíz Forrajero Verde	1,202	1,202	Riego Primavera-Verano
DR092A Río Pánuco-U	Sorgo Grano	10,202	10,202	Riego Otoño-Invierno
	Zacate Verde	8,003	8,003	Riego Perenne
DR093 Tomatlán	Zacate Verde	6,113	6,113	Riego Perenne
	Arroz	893	893	Riego Otoño-Invierno
		881	881	Riego Primavera-Verano
DR105 Nexpa	Zacate Verde	856	856	Riego Perenne
	Maiz Grano	697	697	Riego Otoño-Invierno
		324	324	Riego Primavera-Verano

*Leguminosas

**Cultivos alternativos

En cada Distrito de Riego se consideraron los cultivos principales, cuya superficie sembrada es predominante sobre el resto de cultivos. Además, la selección de

estos se hizo tomando en cuenta que se estableció una tasa anual de aplicación de biosólidos, de modo que se priorizaron los cultivos cíclicos, ya que su periodo vegetativo se encuentra dentro de los 12 meses de duración del año agrícola. Por otro lado, se consideraron cultivos alternativos para los casos de los Distritos de Riego 014 Río Colorado y 017 Región Lagunera y se priorizaron para el análisis de su fertilización, ya que la superficie de sus cultivos predominantes es considerablemente extensa y el aprovechamiento de los biosólidos de las PTAR a las que se ligasen sería mínima. Se consideraron estos cultivos alternativos por tener una superficie sembrada menor a los predominantes, de este modo que en ellos sería posible fertilizar un porcentaje de superficie mayor y así darle un mejor aprovechamiento a los biosólidos.

Las especies vegetales pertenecientes a la familia de las leguminosas viven en simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*, las cuales son capaces de transformar el nitrógeno atmosférico en orgánico. Dichos microorganismos se fijan en las raíces de las leguminosas formando nódulos rosáceos-blanquesinos en los que fijan el nitrógeno atmosférico y a través de ellos trasvasan el nitrógeno a las leguminosas.

El aprovechamiento del nitrógeno atmosférico por medio de las bacterias es una característica casi exclusiva de las leguminosas, de modo que no necesitan fertilización nitrogenada para su crecimiento (Andreu *et. al.*, 2006). Por ello, las especies vegetales leguminosas tales como la alfalfa, frijol (alubia) y el cacahuate no fueron consideradas para el análisis de aplicación de biosólidos y, en el caso de que fuesen cultivos predominantes en los Distritos de Riego, fueron descartados y se priorizaron otras especies vegetales para su fertilización.

6.3 Calidad de los biosólidos

Como se mencionó anteriormente, el contenido de nitrógeno en los biosólidos depende del tratamiento del que se generaron como lodos residuales en las PTAR. Debido a que no se cuenta con datos de calidad de los lodos generados en cada una de las PTAR seleccionadas, se tomarán datos reportados en la literatura

para poder realizar los cálculos de las tasas de aplicación en los diferentes cultivos agrícolas.

6.3.1 Lodos Primarios

De acuerdo con Rigby *et. al.* (2015), en los lodos primarios el contenido de nitrógeno amoniacal es de 5.7 kilogramos por tonelada de sólidos secos, sin embargo no presentan nitrógeno en forma de nitratos. Este contenido de nitrógeno mineral equivale al 15.8% del nitrógeno total contenido en el lodo primario.

Sabiendo lo anterior fue posible determinar el contenido de nitrógeno orgánico y, considerando que la tasa de mineralización anual es del 40%, se calculó el nitrógeno orgánico disponible durante un año y finalmente se determinó el contenido de nitrógeno disponible total para fertilizar los cultivos durante ese periodo de tiempo. Los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Contenido de Nitrógeno en lodos primarios.

Lodo primario	
N _{mineral} (kg/t)	5.7
N _{orgánico} (kg/t)	36.07
N _{orgánico disp} (kg/t)	14.43
N_{disponible total} (kg/t)	20.13

6.3.2 Lodos Activados y Lodos de Filtros Biológicos

De las conclusiones reportadas por Díaz *et al.* (2004) respecto a la calidad del lodo activado se tomaron los datos del contenido de nitrógeno amoniacal y el contenido de nitrógeno orgánico, de 9.8 y 36.4 kilogramos por tonelada de sólidos totales, respectivamente. Con la tasa de mineralización anual del 40% se determinó el contenido de nitrógeno orgánico disponible en un año. En las plantas de tratamiento con procesos de lodos activados se considera que los lodos generados tienen una proporción del 64% de lodo primario y 36% de lodo secundario, de modo que realizando un balance se determina el contenido de

nitrógeno total disponible (Metcalf *et. al.*, 1991). Dado que los procesos de tratamiento en lodos activados y filtros biológicos se basan en la degradación de la materia orgánica por microorganismos aerobios, la información recolectada para lodos activados también fue utilizada para filtros biológicos (Tabla 14).

Tabla 14. Contenido de Nitrógeno en lodos activados y lodos de filtros biológicos.

Lodo activado – Filtros biológicos	
N _{mineral} (kg/t)	9.8
N _{orgánico} (kg/t)	36.4
N _{orgánico disp.} (kg/t)	14.56
N_{disponible total} (kg/t)	24.36

6.3.3 Lodos de procesos de tratamiento primario avanzado

En los lodos de tratamiento primario avanzado el contenido de nitrógeno amoniacal es de 0.82 kilogramos por tonelada de sólidos secos, no presenta contenido de nitrógeno como nitrato y su contenido de nitrógeno orgánico es de 38.2 kilogramos por tonelada de sólidos secos (Barrios *et. al.*, 2002). En la Tabla 15 se presentan los datos del contenido de nitrógeno orgánico disponible en un año y del nitrógeno total disponible para fertilizar.

Tabla 15. Contenido de Nitrógeno en lodos primarios avanzados.

Primario avanzado	
N _{mineral} (kg/Ton)	0.82
N _{orgánico} (kg/Ton)	38.2
N _{orgánico disp} (kg/Ton)	15.28
N_{disponible total} (kg/Ton)	16.1

6.4 Análisis de los cultivos agrícolas para la fijación de biosólidos

La selección del o los principales cultivos para cada Distrito de Riego se hizo de acuerdo a su extensión cultivada y también tomando en cuenta que sean especies vegetales cuya fijación de nitrógeno sea aprovechable, es decir las especies leguminosas fueron descartadas tal y como se mencionó anteriormente. A continuación se presentan en la Tabla 16 las especies vegetales que se seleccionaron para la aplicación de biosólidos para cada Distrito de Riego.

Tabla 16. Lista de los cultivos analizados para la aplicación de biosólidos en cada Distrito de Riego.

Distrito de Riego	Cultivo Principal	Características	
DR001 Pabellón	Maíz Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	8.76
		Requerimiento de N (kg/ha) para 8760 kg/ha	192.72
DR003 Tula	Maíz Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	11.9
		Requerimiento de N (kg/ha) para 11900 kg/ha	261.8
DR004 Don Martín	Trigo Grano Riego (Otoño-Invierno)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	30
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	3.5
		Requerimiento de N (kg/ha) para 3500 kg/ha	105
	Sorgo Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	30
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	3.09
		Requerimiento de N (kg/ha) para 3090 kg/ha	92.7

Distrito de Riego	Cultivo Principal	Características	
DR005 Delicias	Nogal (Nuez) Riego Perenne	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	30
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	1.48
		Requerimiento de N (kg/ha) para 1480 kg/ha	44.4
DR009 Valle de Juárez	Algodón Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	120
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	2.9
		Requerimiento de N (kg/ha) para 2900 kg/ha	348
DR010 Culiacán-Humaya	Sorgo Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	30
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	6.13
		Requerimiento de N (kg/ha) para 6130 kg/ha	183.9
DR011 Alto Río Lerma	Cebada Riego (Otoño-Invierno)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	25
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	5.46
		Requerimiento de N (kg/ha) para 5460 kg/ha	136.5
DR013 Estado de Jalisco	Maíz Grano Temporal (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	5.72
		Requerimiento de N (kg/ha) para 5720 kg/ha	125.84
DR014 Río Colorado	Sorgo Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	30
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	4.93
		Requerimiento de N (kg/ha) para 4930 kg/ha	147.9

Distrito de Riego	Cultivo Principal	Características	
DR017 Región Lagunera	Nogal (Nuez) Riego (Perennes)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	30
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	1.93
		Requerimiento de N (kg/ha) para 1930 kg/ha	57.9
DR020 Morelia	Maíz Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	6.23
		Requerimiento de N (kg/ha) para 6230 kg/ha	137.06
DR025 Bajo Río Bravo	Sorgo Grano Temporal (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	30
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	4.47
		Requerimiento de N (kg/ha) para 4470 kg/ha	134.1
DR026 Bajo Río San Juan	Sorgo Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	5.06
		Requerimiento de N (kg/ha) para 5060 kg/ha	151.8
DR030 Valsequillo	Maíz Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	7.11
		Requerimiento de N (kg/ha) para 7110 kg/ha	156.4
DR031 Las Lajas	Sorgo Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	30
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	3.6
		Requerimiento de N (kg/ha) para 3600 kg/ha	108
	Sorgo Forrajero Verde	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	19.2

Distrito de Riego	Cultivo Principal	Características	
	Riego (Primavera-Verano)	Rendimiento del cultivo (ton/ha)	7.5
		Requerimiento de N (kg/ha) para 7500 kg/ha	144
	Soya Industrial Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	80
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	3.3
		Requerimiento de N (kg/ha) para 3300 kg/ha	264
	Maíz Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	5.5
		Requerimiento de N (kg/ha) para 5500 kg/ha	121
	DR033 Edo. Méx.	Maíz Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)
Rendimiento del cultivo (ton/ha)			3
Requerimiento de N (kg/ha) para 3000 kg/ha			66
DR035 La Antigua	Caña de Azúcar Riego Perenne	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	1.3
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	98.35
		Requerimiento de N (kg/ha) para 98350 kg/ha	127.855
DR049 Río Verde	Maíz Elotero Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	12
		Requerimiento de N (kg/ha) para 12000 kg/ha	264
DR050	Sorgo Forrajero Verde	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	19.2

Distrito de Riego	Cultivo Principal	Características	
Acuña-Falcón	Riego (Otoño-Invierno)	Rendimiento del cultivo (ton/ha)	23.5
		Requerimiento de N (kg/ha) para 23500 kg/ha	451.2
DR053 Estado de Colima	Plátano Riego Perenne	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	8
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	45.07
		Requerimiento de N (kg/ha) para 45070 kg/ha	360.56
DR088 Chiconautla	Maíz Forraje Verde Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	12.67
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	80
		Requerimiento de N (kg/ha) para 80000 kg/ha	1,013.6
DR092A Río Pánuco-U	Sorgo Grano Riego (Otoño-Invierno)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	30
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	2.45
		Requerimiento de N (kg/ha) para 2450 kg/ha	73.5
DR093 Tomatlán	Arroz Riego (Otoño-Invierno)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22.2
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	5.1
		Requerimiento de N (kg/ha) para 5100 kg/ha	113.22
	Arroz Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22.2
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	5
		Requerimiento de N (kg/ha) para 5000 kg/ha	111
DR105 Nexpa	Maíz Grano Riego (Otoño-Invierno)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	5

Distrito de Riego	Cultivo Principal	Características	
		Requerimiento de N (kg/ha) para 5000 kg/ha	110
	Maíz Grano Riego (Primavera-Verano)	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	22
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	5
		Requerimiento de N (kg/ha) para 5000 kg/ha	110
	Buffel (Zacate) Verde Riego Perenne	Requerimiento de Nitrógeno (kg/ton)	8.24
		Rendimiento del cultivo (ton/ha)	20
		Requerimiento de N (kg/ha) para 20000 kg/ha	164.8

El rendimiento de cada cultivo se tomó de las Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego correspondientes al año Agrícola 2013-2014 (CONAGUA, 2015). Con base en este dato se determinó un requerimiento de nitrógeno específico para cada uno de los cultivos estudiados. A continuación se citan las referencias de las cuales se obtuvo la información correspondiente a los requerimientos de nitrógeno expresados en kilogramos del nutriente que deben ser asimilados por cada especie vegetal para producir una tonelada de grano o materia seca.

- Maíz grano (IPNI, 2002)
- Sorgo grano (IPNI, 2002)
- Trigo grano (IPNI, 2002. López, 2013)
- Nogal (nuez) (Compo Expert, 2015)
- Algodón (IPNI, 2002)
- Cebada (López, 2013)
- Sorgo forrajero verde (AgroEs)
- Soya industrial (IPNI, 2002)

- Caña de azúcar (IPNI, 2002)
- Maíz elotero (IPNI, 2002)
- Plátano (Sela, 2014)
- Maíz forraje verde (AgroEs)
- Arroz (IPNI, 2002)
- Buffel (zacate) verde (Sáenz *et. al.*, 2015)

6.5 Relación de PTAR–DR por Estados.

A continuación se muestra la ubicación de las plantas de tratamiento de agua residual municipales analizadas con respecto a los Distritos de Riego para cada Estado de la República Mexicana en donde se propone aplicar los lodos, así como las rutas de transporte del biosólido propuestas.

6.5.1 Aguascalientes

El estado de Aguascalientes cuenta con 134 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, las cuales tratan anualmente cerca de 70 millones 956 mil metros cúbicos de aguas residuales municipales (CONAGUA, 2016). La producción de lodos residuales en la entidad se estima de 17 mil 105 toneladas de lodo seco por año.

La PTAR Ciudad de Aguascalientes es la única planta con una capacidad instalada superior al metro cúbico por segundo dentro de la entidad y se encuentra localizada en el municipio Aguascalientes. Con una capacidad instalada de 2 metros cúbicos por segundo y operando con un proceso dual que involucra procesos de lodos activados y filtros biológicos (CONAGUA, 2016), la planta genera aproximadamente 7 mil 243 toneladas de lodo seco al año. Posterior al tratamiento del agua se produce un lodo residual, que tras ser estabilizado se estima que podría aportar 21.65 kilogramos de nitrógeno, que estarían disponibles por un año, por tonelada de lodo.

Tabla 17. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Aguascalientes.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	134
Capacidad instalada (m ³ /s)	4.71
Caudal tratado (m ³ /s)	2.25
Producción estimada de lodos (t ST/año)	17,104.9
Plantas con capacidad superior a 1,000 (l/s)	1
PTAR Ciudad de Aguascalientes	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	2
• Caudal tratado (m ³ /s)	0.95
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	7,242.8
Distritos de Riego	
Superficie total sembrada (ha)	5,616
Superficie total cosechada (ha)	5,616
Producción (Miles de toneladas)	128.06
DR001 Pabellón	
• Superficie sembrada (ha)	5,616
• Superficie cosechada (ha)	5,616
Cultivos principales	
• Maíz grano (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie sembrada (ha)	3,568
○ Superficie cosechada (ha)	3,568

El Distrito de Riego más cercano a la PTAR Ciudad de Aguascalientes es el DR001 Pabellón, ubicado en la misma entidad. El cultivo predominante del distrito y seleccionado para la fijación del biosólido es el maíz de grano cultivado por riego en la temporada Primavera-Verano, con una superficie sembrada de 3 mil 568

hectáreas (CONAGUA, 2015). Se estima que dicha siembra requiere cerca de 193 kilogramos de nitrógeno por hectárea de cultivo.

La tasa anual de aplicación de lodo se estima en 8.9 toneladas de sólidos totales por hectárea de cultivo, de modo que se requieren aproximadamente 31 mil 757 toneladas de lodo seco por año para satisfacer la demanda de nitrógeno del maíz grano, De esta manera se sabe que en un año será posible fertilizar un 23% de la superficie sembrada de maíz de grano.

En la Figura 5 se muestra la ruta más conveniente para el acarreo del biosólido generado en la PTAR Ciudad de Aguascalientes hacia el DR001 Pabellón. La distancia recorrida será de aproximadamente 49 kilómetros.

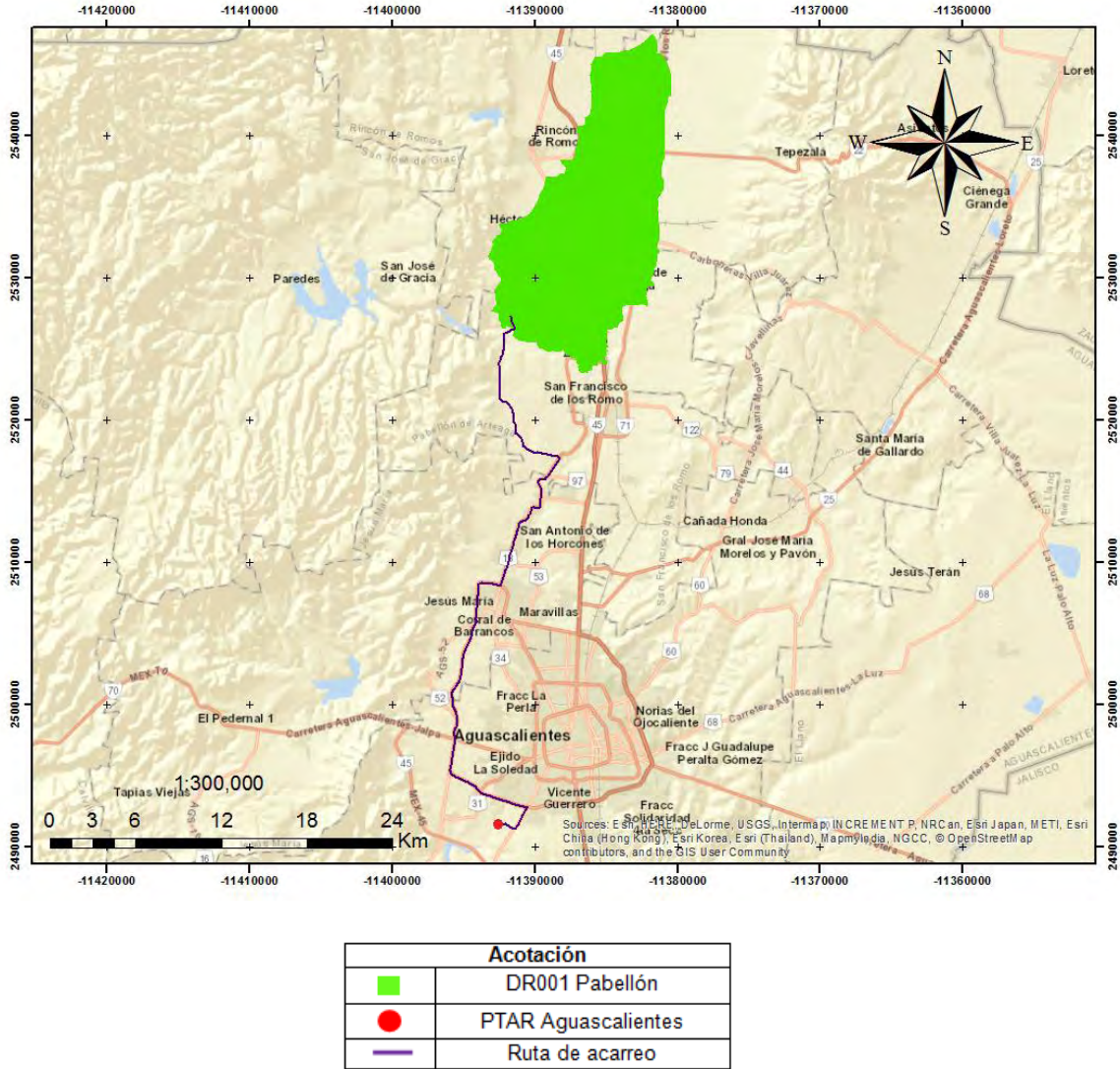


Figura 5. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR al Distrito de Riego en el Estado de Aguascalientes.

6.5.2 Baja California Norte

En el Estado de Baja California Norte se tiene registro de 43 Plantas de Tratamiento de Agua Residual Municipal que dan saneamiento a más de 172 millones de metros cúbicos al año (CONAGUA, 2016). Del tratamiento se estima que se generan 41 mil 597 toneladas de lodos secos.

La Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales Binacional tiene la capacidad de tratar un gasto promedio diario de 1,100 litros por segundo de aguas residuales producidas por la Ciudad de Tijuana. La planta se encuentra localizada en un sitio de aproximadamente 18 hectáreas al Oeste de la comunidad de San Ysidro, California y ha sido clave en la restauración de la calidad del medio ambiente del Valle Del Río Tijuana y en salvaguardar la salud de los residentes de ambos lados de la frontera. La planta emplea el proceso de lodos activados y se estima que produce anualmente 8,169 toneladas de lodo seco.

El DR014 Río Colorado cuya superficie sembrada ronda las 185 mil hectáreas es el Distrito de Riego más cercano a la PTAR Binacional. El trigo de grano cultivado por riego de temporada Otoño-Invierno es el cultivo principal, sin embargo se consideró fertilizar una superficie de 3 mil 272 hectáreas cultivada con sorgo de grano de temporada Primavera-Verano con el fin de fertilizar un mayor porcentaje de superficie a partir de los biosólidos generados de la PTAR Binacional (CONAGUA, 2015).

Tabla 18. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Baja California Norte.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	43
Capacidad instalada (m ³ /s)	7.77
Caudal tratado (m ³ /s)	5.48
Producción estimada de lodos (t ST/año)	41,596.6
Plantas con capacidad superior a 1,000 L/s	1
PTAR Binacional o Pitar	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.1
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.08
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	8,169
Distritos de Riego	
Superficie total sembrada (ha)	184,909
Superficie total cosechada (ha)	184,909
Producción (Miles de toneladas)	2,949
DR014 Río Colorado	
• Superficie sembrada (ha)	184,909
• Superficie cosechada (ha)	184,909
Cultivos principales	
• Sorgo grano (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie sembrada (ha)	3,272
○ Superficie sembrada (ha)	3,272

La tasa anual de aplicación de lodos se estimó de 7 toneladas de sólidos totales por hectárea de cultivo. Por su parte, el lodo requerido por la superficie sembrada de sorgo de grano se estima de 22 mil 349 toneladas anuales. De esta manera, es posible fertilizar el 37% de la superficie cultivada con sorgo de grano del Distrito de Riego 014.

La posible ruta de acarreo del biosólido se presenta en la Figura 6, la cual se estima de unos 212 Kilómetros.

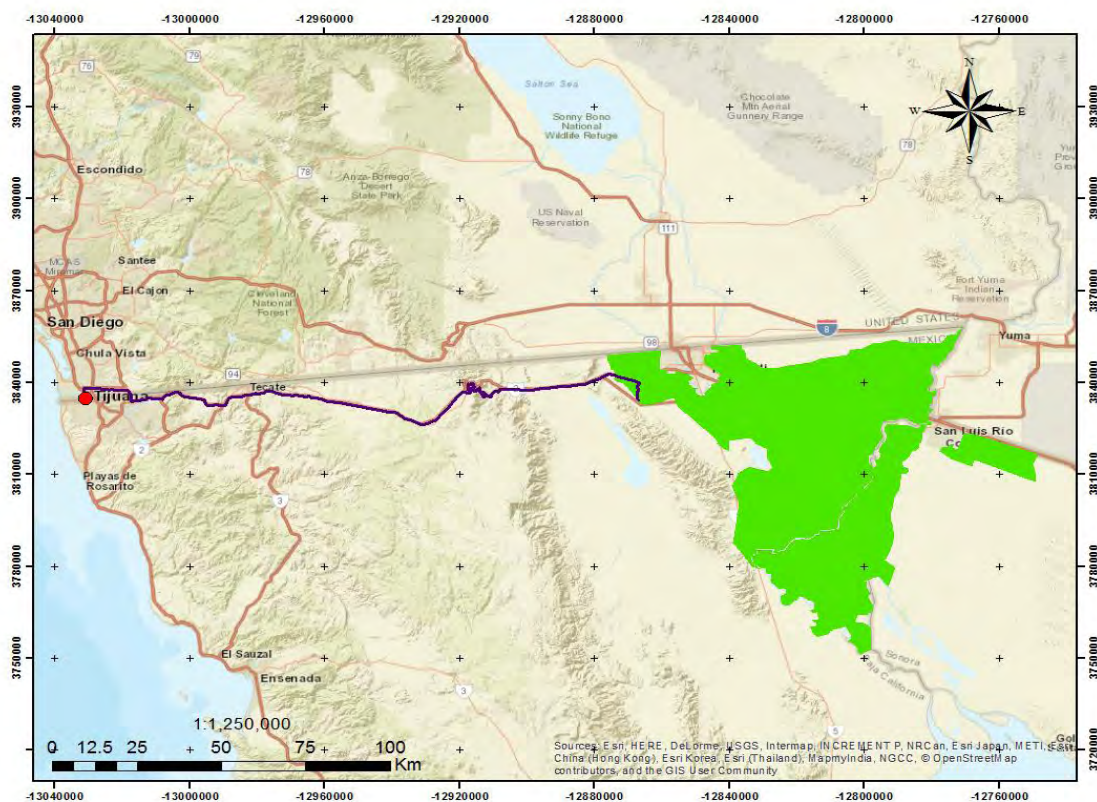


Figura 6. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR al Distrito de Riego en el Estado de Baja California Norte.

6.5.3 Chihuahua

En el Estado de Chihuahua se da un saneamiento anual a alrededor de 222 millones de metros cúbicos de aguas residuales, de las cuales se generan poco más de 53 mil toneladas de lodo seco. De las 179 PTAR que operan en la entidad, cuatro tienen capacidad instalada superior al metro cúbico por segundo (CONAGUA, 2016).

En el municipio de Ciudad Juárez se encuentran localizadas dos de las cuatro plantas más representativas de Chihuahua, la PTAR Sur y la PTAR Norte con una capacidad instalada de 2 y de 1.6 metros cúbicos por segundo, respectivamente. Ambas plantas, operadas por Concesionaria de Aguas Residuales de Juárez, S.A. de C.V. (CAR), tienen un proceso de lodos activados y descargan al Río Bravo (BDAN, 2015). Se estima que la PTAR Sur genera 12 mil 300 toneladas de lodo seco al año, por su parte la PTAR Norte produce anualmente alrededor de 10 mil 249 toneladas de lodo seco. Actualmente los lodos producidos en la PTAR Norte son inicialmente espesados y posteriormente se bombean hacia la PTAR Sur donde el lodo de ambas plantas se combina y se envían a los digestores anaerobios para su estabilización. Posteriormente los biosólidos se secan parcialmente en filtros prensa y son transportados para su disposición final en un sitio autorizado dentro de las instalaciones del relleno sanitario municipal de Ciudad Juárez (BDAN, 2015). Como una alternativa distinta para el destino de los biosólidos de ambas plantas, se propone su reutilización como fertilizantes en el Distrito de Riego 009 Valle de Juárez.

La PTAR Sur y Norte de Ciudad Juárez se encuentran dentro de la extensión del DR009, cuyo principal cultivo es el algodón de riego de temporada Primavera-Verano, con una superficie sembrada de 4 mil 709 hectáreas (CONAGUA, 2015). De acuerdo a los requerimientos de nitrógeno que requiere dicho cultivo se estima que la cantidad de lodo requerida para fertilizar la superficie sembrada es de 75 mil 861 toneladas de lodo seco por año. Ambas plantas generan en total aproximadamente 22 mil 548 toneladas de lodo seco anuales. Así, se conseguiría fertilizar al año aproximadamente un 30% de la superficie sembrada de algodón del Distrito de Riego Valle de Juárez.

En el municipio de Chihuahua se localizan las PTAR Sur y Norte de Chihuahua las cuales tienen capacidad para tratar un caudal de 2.5 y 1,2 metros cúbicos por segundo, respectivamente, empleado un proceso de lodos activados (CONAGUA, 2016). La generación de lodos de la PTAR Sur se estima de 12 mil 300 toneladas de lodo seco por año, por su parte, la PTAR Norte produce 3 mil 264 toneladas

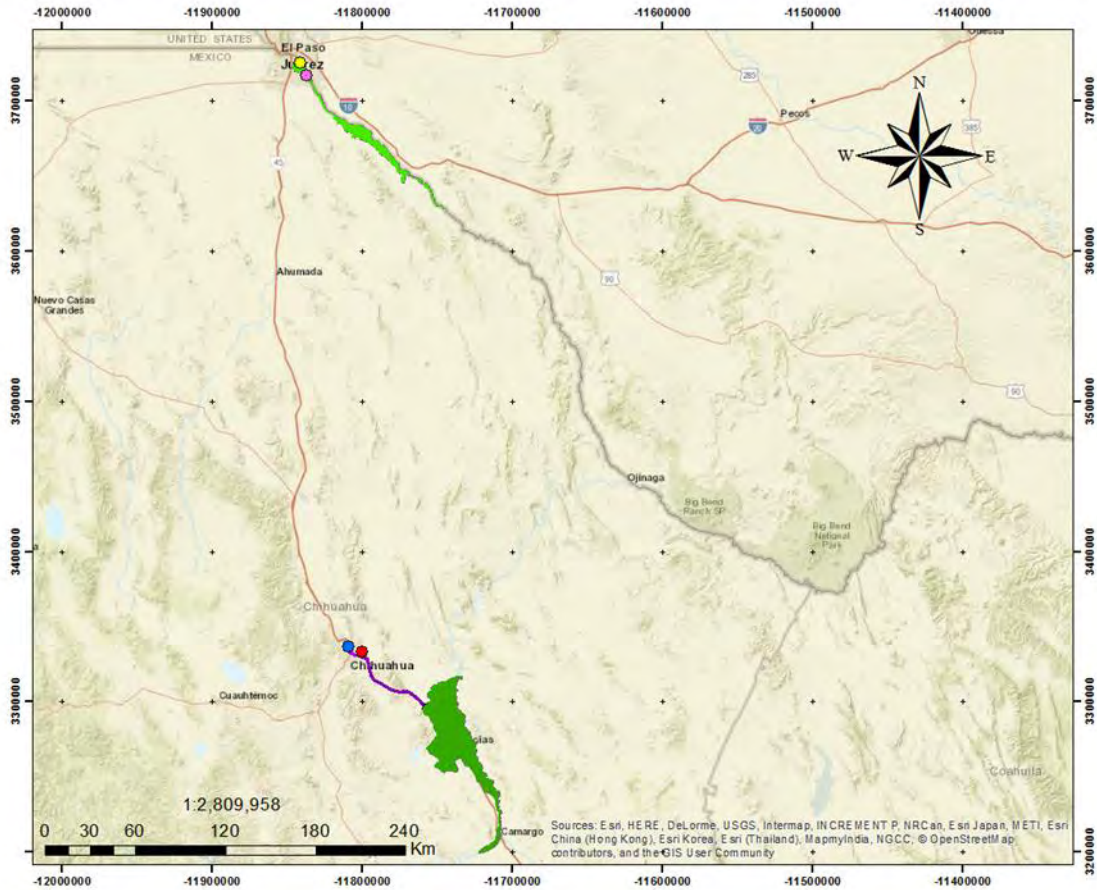
anuales. La propuesta para reutilizar los biosólidos producidos por las dos plantas es enviarlos al DR005 Delicias, siendo el Distrito de Riego más cercano a las plantas. Se propone fertilizar la superficie sembrada de nogal de riego perenne, cuya extensión es de poco más de 8 mil hectáreas (CONAGUA, 2015). De acuerdo a los requerimientos nutrimentales de nitrógeno del cultivo, se requeriría 17 mil 023 toneladas de lodo seco al año para fertilizar la superficie. Anualmente se conseguiría fertilizar aproximadamente un 91% de la superficie sembrada con nogal.

Tabla 19. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Chihuahua.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	179
Capacidad instalada (m ³ /s)	10.28
Caudal tratado (m ³ /s)	7.03
Producción estimada de lodos (t ST/año)	53,349
Plantas con capacidad superior a 1,000 L/s	4
PTAR Chihuahua Sur	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	2.5
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.62
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	12,299
PTAR Sur de Cd. Juárez	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	2
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.62
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	12,299
PTAR Norte de Cd. Juárez	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.6
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.35
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	10,249.2

PTAR Chihuahua Norte	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.2
• Caudal tratado (m ³ /s)	0.43
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	3,264.6
Distritos de Riego	
Superficie total sembrada (ha)	93,983
Superficie total cosechada (ha)	92,348
Producción (Miles de toneladas)	2,397
DR005 Delicias	
• Superficie sembrada (ha)	54,096
• Superficie cosechada (ha)	54,096
Cultivos principales	
• Nogal (Nuez) (Riego Perenne)	
○ Superficie sembrada (ha)	8,302
○ Superficie sembrada (ha)	8,302
DR009 Valle de Juárez	
• Superficie sembrada (ha)	9,780
• Superficie cosechada (ha)	9,780
Cultivos principales	
• Algodón (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie sembrada (ha)	4,709
○ Superficie sembrada (ha)	4,709

En la Figura 7 se puede apreciar las rutas de acarreo de biosólidos sugeridas de las PTAR Sur y Norte de Chihuahua hacia el Distrito de Riego Delicias. Las distancias recorridas son de 68 y 80 kilómetros, respectivamente. Para el caso de las PTAR Norte y Sur de Ciudad Juárez no se propuso ruta de acarreo debido a que se encuentran dentro de la extensión del Distrito de Riego Valle de Juárez.



Acotación	
■	DR009 Valle de Juárez
●	PTAR Norte de Cd. Juárez
●	PTAR Sur de Cd. Juárez
■	DR005 Delicias
●	PTAR Chihuahua Norte
●	PTAR Chihuahua Sur
—	Ruta de acarreo PTAR Chihuahua Norte y Sur al DR005

Figura 7. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Chihuahua.

6.5.4 Ciudad de México

La Ciudad de México tiene registradas 29 plantas de tratamiento de agua residual municipal, de las cuales solamente una tiene una capacidad instalada que supera 1 metro cúbico por segundo. Localizada en el municipio de Iztapalapa, la PTAR Cerro de la Estrella tiene capacidad para tratar un caudal de 3 metros cúbicos por segundo a partir de un proceso de lodos activados (CONAGUA, 2016). Se estima que anualmente la planta genera 16 mil 626 toneladas de lodos secos.

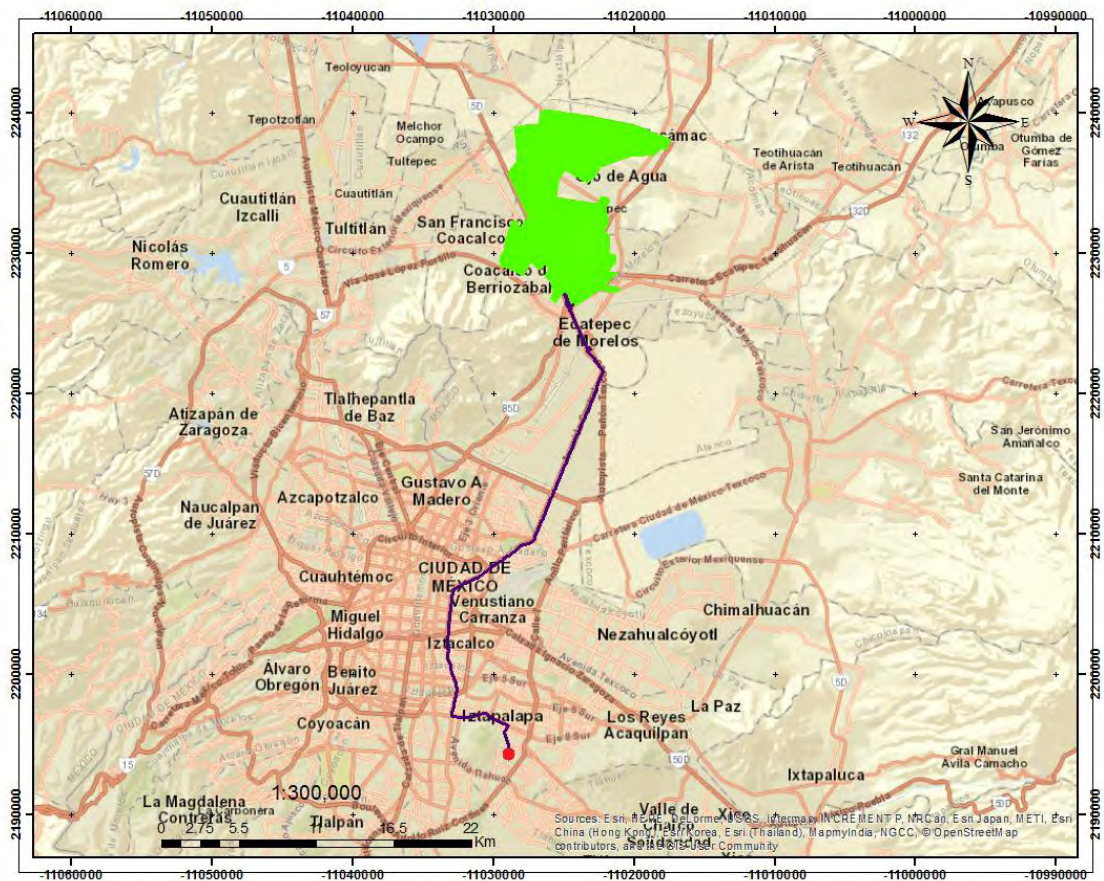
Se propone que los biosólidos generados por la PTAR Cerro de la Estrella sean enviados al Distrito de Riego 088 Chiconautla, localizado en el Estado de México, para fertilizar una superficie sembrada de mil 728 hectáreas de maíz forrajero verde. Los rendimientos de esta especie vegetal son elevados, de modo que requieren de cantidades considerables de nitrógeno para desarrollarse (CONAGUA 2015). Para fertilizar tal superficie en un año se estima que se requiere 56 mil 267 toneladas de lodo seco. Alrededor del 29% de la superficie sembrada por maíz forrajero verde lograría ser fertilizada en un año con los biosólidos que se generan anualmente en la PTAR Cerro de la Estrella.

Tabla 20. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de la Ciudad de México.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	29
Capacidad instalada (m ³ /s)	5.6
Caudal tratado (m ³ /s)	3.18
Producción estimada de lodos (t ST/año)	24,127.4
Plantas con capacidad superior a 1,000 L/s	1
PTAR Cerro de la Estrella	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	3
• Caudal tratado (m ³ /s)	2.19
• Producción estimada de lodos (tST/año)	16,626.5

Distritos de Riego	
Superficie total sembrada (ha)	0
Superficie total cosechada (ha)	0
Producción (Miles de toneladas)	0
DR088 Chiconautla	
• Superficie sembrada (ha)	1,728
• Superficie cosechada (ha)	1,728
Cultivos principales	
• Maíz Forrajero Verde (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie sembrada (ha)	1,202
○ Superficie sembrada (ha)	1,202

El acarreo del biosólido de la PTAR Cerro de la Estrella hacia el Distrito de Riego de Chiconautla propuesto se ilustra en la Figura 8, la distancia recorrida es de aproximadamente 44 kilómetros.



Acotación	
■	DR088 Chiconautla
●	PTAR Cerro de la Estrella
—	Ruta de acarreo

Figura 8. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de la Ciudad de México.

6.5.5 Coahuila

En el Estado de Coahuila se trata un caudal diario de 4.5 metros cúbicos por segundo de aguas residuales a través de 21 plantas de tratamiento. La PTAR Principal es la única planta de Coahuila con una capacidad instalada superior al metro cúbico por segundo, teniendo la capacidad de tratar 1.2 metros cúbicos por segundo de una mezcla de aguas domésticas e industriales (CONAGUA, 2016). La planta se encuentra localizada en el municipio de Saltillo y es operada por la empresa IDEAL Saneamiento de saltillo (ISASAL) y consiste en un sistema de pre

tratamiento (rejilla y desarenador), una serie de clarificadores primarios y cinco trenes de tratamiento biológico (lodos activados) que constan de un reactor con difusores de burbuja y un clarificador secundario cada uno. El tratamiento de los lodos residuales consiste en un digestor, un filtro banda y la adición de cal para su estabilización (Tobón, et al, 2010).

Tabla 21. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Coahuila.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	21
Capacidad instalada (m ³ /s)	5.64
Caudal tratado (m ³ /s)	4.5
Producción de lodos estimada (t ST/año)	34,156.4
Plantas que tratan 1000 L/s	1
PTAR Principal	
<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad instalada (m³/s) • Caudal tratado (m³/s) • Producción de lodos estimada (t ST/año) 	1.2 0.9 6,832.8
Distritos de Riego	
Superficie total cultivada (ha)	4,185
Superficie total cosechada (ha)	4,185
Producción (Miles de toneladas)	84
DR017 Región Lagunera	
<ul style="list-style-type: none"> • Superficie cosechada (ha) • Superficie cultivada (ha) 	47,845 47,845
Cultivo Principal	
<ul style="list-style-type: none"> • Nogal (Riego Perenne) <ul style="list-style-type: none"> ○ Superficie cosechada (ha) ○ Superficie cultivada (ha) 	4,894 4,894

Se estima que la PTAR Principal genera anualmente 6 mil 833 toneladas de lodos secos. Para su reutilización como fertilizantes se propone ser enviados al Distrito de Riego Región Lagunera, localizado entre los Estados de Coahuila y Durango, y fertilizar una superficie de 4 mil 894 hectáreas cosechadas con nogal (CONAGUA, 2015). A pesar que de tal cultivo no es el predominante en el distrito, se seleccionó para darle un mejor aprovechamiento a los biosólidos, esto es, fertilizar un mayor porcentaje de superficie, ya que de fertilizar el cultivo predominante se cubriría un porcentaje muy reducido de su superficie. Se estima que para ser fertilizada la superficie requerirá anualmente aproximadamente 13 mil toneladas de lodo seco. De modo que con la producción anual de lodos residuales de la PTAR Principal se podrá fertilizar anualmente cerca del 52% de la superficie sembrada con nogal.

En la Figura 9 se muestra la ruta propuesta para el acarreo de los biosólidos. La distancia que se recorrería en este trayecto sería de aproximadamente 241 kilómetros.

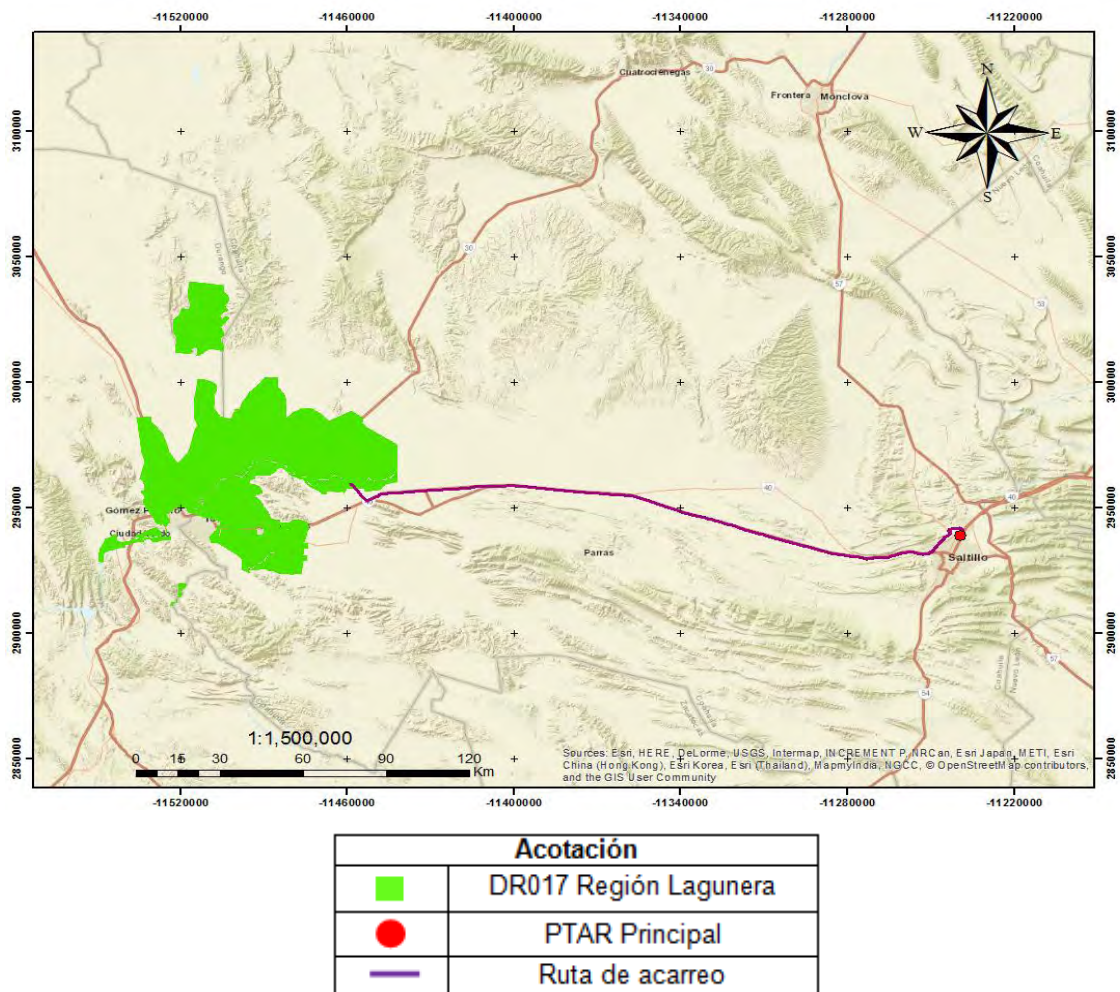


Figura 9. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Coahuila.

6.5.6 Colima

Anualmente se tratan aproximadamente 50 millones 772 mil 960 metros cúbicos de aguas residuales municipales en el estado de Colima. Ubicada en el municipio de Colima, sobre la carretera Los Limones-Coquimatlán, la PTAR Colima – Villa de Álvarez tiene la capacidad de dar tratamiento a 1.2 metros cúbicos de aguas residuales por segundo mediante un proceso de lodos activados (CONAGUA, 2016). Se ha estimado que la planta genera 6 mil 453 toneladas de lodo seco por año.

Para la reutilización del biosólido que genera la PTAR se propone su uso para fertilizar una superficie sembrada de plátano de 7 mil 534 hectáreas

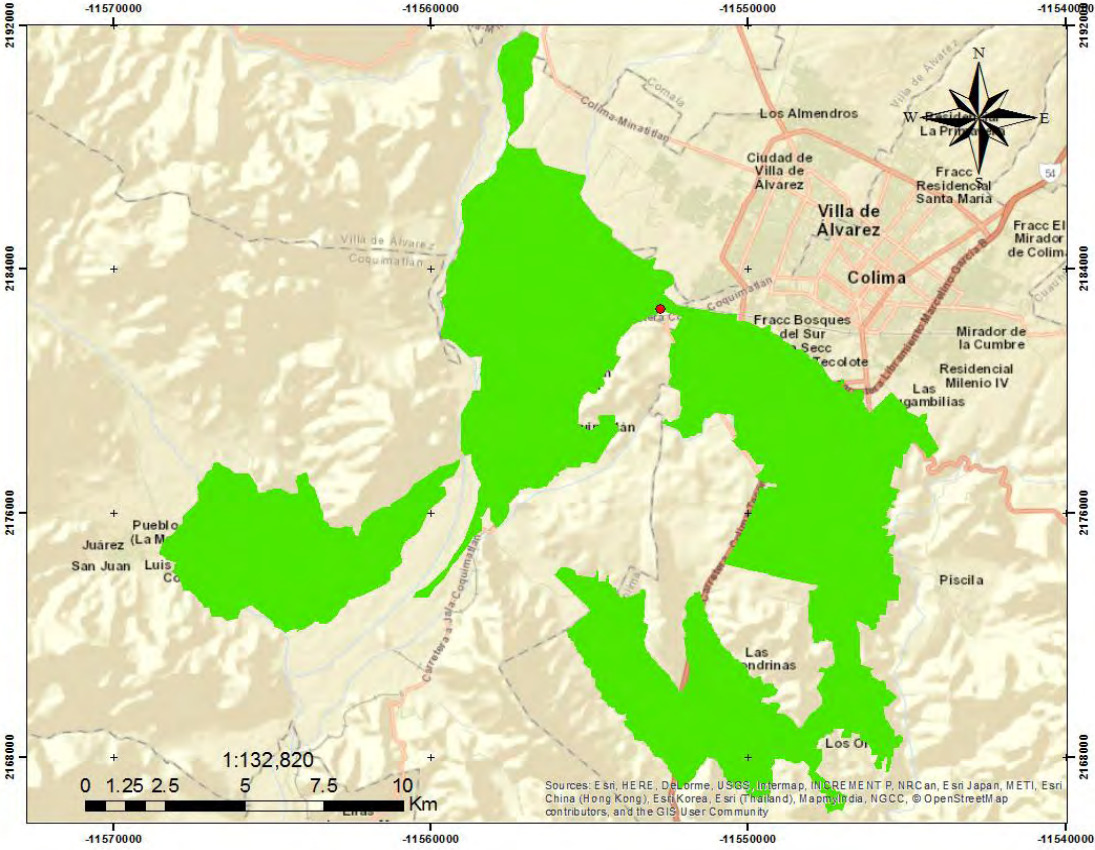
correspondiente al Distrito de Riego 053 Estado de Colima, La PTAR Colima – Villa de Álvarez se encuentra localizada dentro de la extensión de dicho distrito, el cual abarca unas 26 mil 505 hectáreas.

Tabla 22. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Colima.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	67
Capacidad instalada (m ³ /s)	2.3
Caudal tratado (m ³ /s)	1.61
Producción estimada de lodos (t ST/año)	12,253.5
Plantas con capacidad superior a 1,000 L/s	1
PTAR Colima - Villa de Álvarez	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.2
• Caudal tratado (m ³ /s)	0.85
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	6,453.2
Distritos de Riego	
Superficie total sembrada (ha)	54,302
Superficie total cosechada (ha)	52,828
Producción (Miles de toneladas)	3,080
DR053 Estado de Colima	
• Superficie sembrada (ha)	26,505
• Superficie cosechada (ha)	26,495
Cultivos principales	
• Plátano (Riego Perenne)	
○ Superficie sembrada (ha)	7,524
○ Superficie sembrada (ha)	7,524

La fertilización anual de la superficie sembrada con plátano demanda alrededor de 125 mil 287 toneladas de lodo seco, de modo que por año se conseguiría fertilizar aproximadamente el 5% de la superficie.

En la Figura 10 se muestra la ubicación de la PTAR Colima – Villa de Álvarez y la extensión que abarca el DR053 Estado de Colima. No se trazó una ruta de acarreo ya que la PTAR se encuentra dentro de la superficie del Distrito de Riego.



Acotación	
■	DR053 Estado de Colima
●	PTAR Colima-Villa de Álvarez
—	Ruta de acarreo

Figura 10. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Colima.

6.5.7 Estado de México

El Estado de México cuenta con 180 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Tres de estas plantas fueron seleccionadas para este estudio por tener una capacidad instalada superior a un metro cúbico por segundo. En el municipio de Toluca se localizan las PTAR Toluca Norte y Toluca Oriente, cada una con capacidad para tratar 1.28 y 1 metro cúbico de agua residual por segundo (CONAGUA, 2016).

La PTAR Toluca Norte tiene una generación anual estimada de 9 mil 110 toneladas de lodos secos, por su parte la PTAR Toluca Oriente genera 6 mil 764 toneladas. Para ambas plantas la propuesta es reutilizar los biosólidos que generan como fertilizantes en una superficie que es sembrada con maíz de grano y correspondiente al Distrito de Riego 033 Estado de México (CONAGUA, 2015). Tal superficie, con una extensión de 6 mil 252 hectáreas, requeriría anualmente aproximadamente 19 mil 056 toneladas de lodo seco para satisfacer el requerimiento de nitrógeno del cultivo. Con la aportación del biosólido por parte de ambas plantas de tratamiento se estima que un 83% de la superficie sembrada con maíz de grano del DR033 sería fertilizada anualmente.

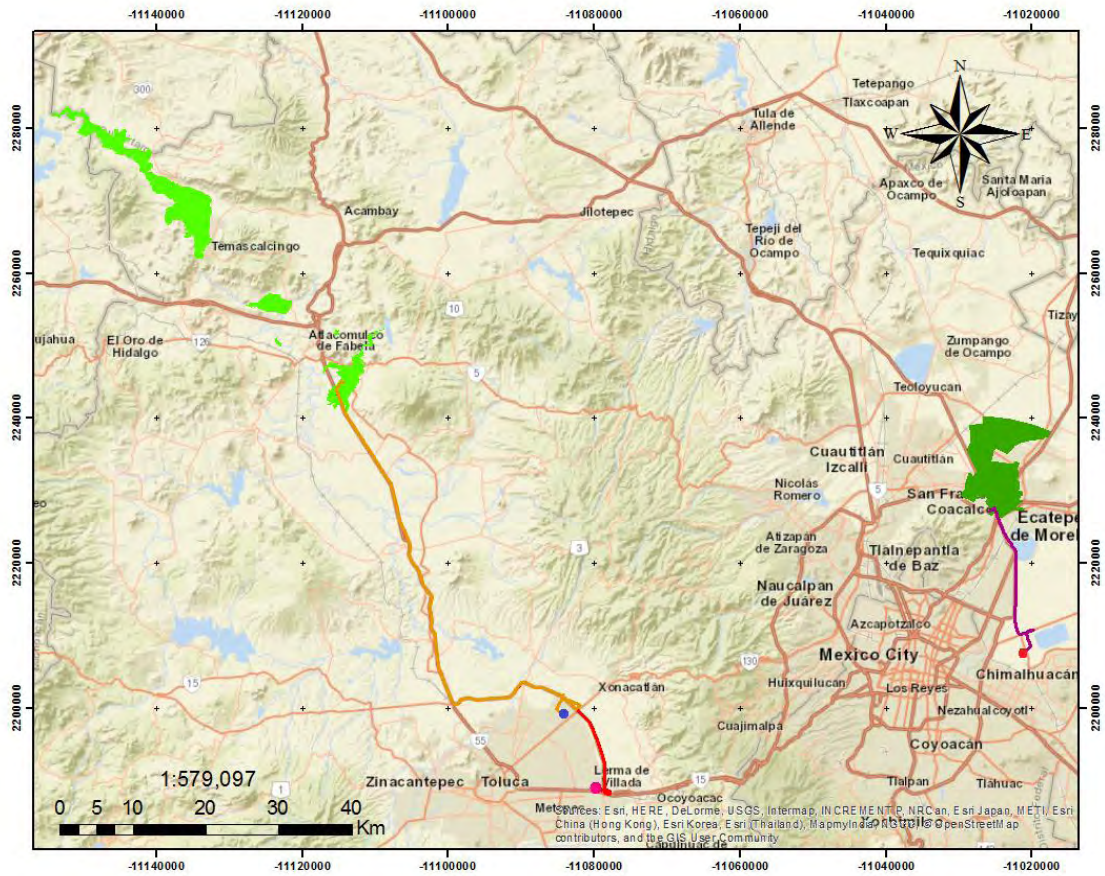
En el municipio de Chimalhuacán se encuentra localizada la PTAR Lago de Texcoco I que, mediante un proceso de lodos activados, es capaz de dar tratamiento a un caudal de 1 metro cúbico de aguas residuales por segundo (CONAGUA, 2016). Se estima que del saneamiento se genera anualmente 6 mil 073 toneladas de lodo seco, mismas que podrían reutilizarse como fertilizante en el Distrito de Riego 088 Chiconautla. Se propone fertilizar anualmente una superficie de mil 202 hectáreas sembradas con maíz forrajero verde. Con base en los requerimientos de nitrógeno del cultivo se requeriría aproximadamente 56 mil 267 toneladas de lodo seco para fertilizar anualmente la superficie, La producción anual de biosólidos de la planta sería suficiente para fertilizar cerca del 11% de la superficie sembrada de maíz forrajero verde.

Tabla 23. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de México.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	180
Capacidad instalada (m ³ /s)	10.98
Caudal tratado (m ³ /s)	7.59
Producción estimada de lodos (t ST/año)	57,646.1
Plantas con capacidad superior a 1,000 L/s	3
PTAR Toluca Norte	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.28
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.2
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	9110.4
PTAR Toluca Oriente	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1
• Caudal tratado (m ³ /s)	0.891
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	6,764.5
PTAR Lago de Texcoco I	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1
• Caudal tratado (m ³ /s)	0.8
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	6,073.6
Distritos de Riego	
Superficie total sembrada (ha)	16,154
Superficie total cosechada (ha)	16,154
Producción (Miles de toneladas)	282
DR033 Estado de México	
• Superficie sembrada (ha)	6,789
• Superficie cosechada (ha)	6,789
Cultivos principales	

<ul style="list-style-type: none"> • Maíz grano (Riego Primavera-Verano) <ul style="list-style-type: none"> ○ Superficie sembrada (ha) 6,252 ○ Superficie sembrada (ha) 6,252 	
DR088 Chiconautla	
<ul style="list-style-type: none"> • Superficie sembrada (ha) 1728 • Superficie cosechada (ha) 1,728 	
Cultivos principales	
<ul style="list-style-type: none"> • Maíz forrajero verde (Riego Primavera-Verano) <ul style="list-style-type: none"> ○ Superficie sembrada (ha) 1,202 ○ Superficie sembrada (ha) 1,202 	

La Figura 11 muestra las rutas de acarreo del lodo que se proponen. El transporte del material de la PTAR Toluca Norte al Distrito de Riego Estado de México recorrería una distancia de 75 kilómetros y de la PTAR Toluca Oriente la distancia recorrida sería aproximadamente de 82 kilómetros. Por su parte, el transporte del biosólido generado en la PTAR Lago de Texcoco I hacia el Distrito de Riego Chiconautla recorre una distancia de 26 kilómetros, aproximadamente.









Acotación	
	DR033 Estado de México
	PTAR Toluca Norte
	Ruta de acarreo PTAR Toluca Norte - DR033
	PTAR Toluca Oriente
	Ruta de acarreo PTAR Toluca Oriente – DR033
	DR088 Chiconautla
	Ruta de acarreo PTAR Chihuahua Norte y Sur al DR005
	Ruta de acarreo PTAR Lago de Texcoco I - DR088

Figura 11. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de México.

6.5.8 Guanajuato

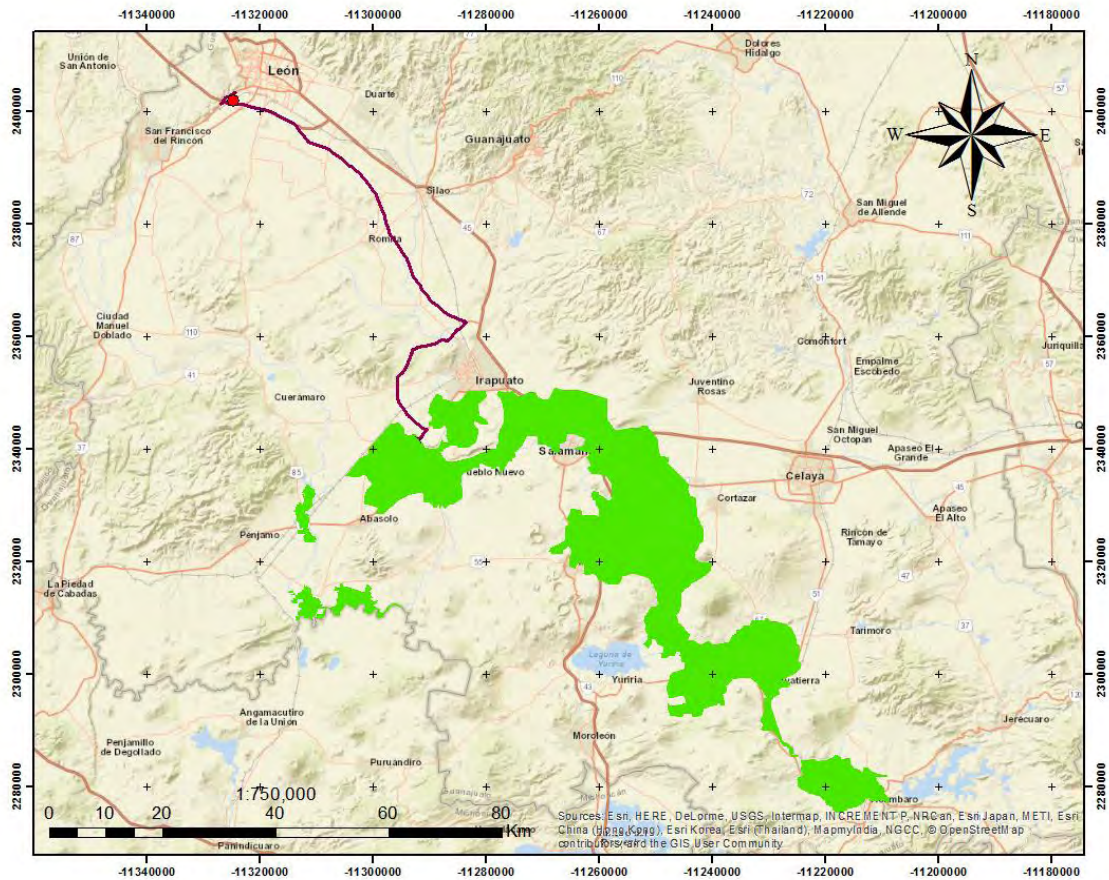
Guanajuato da tratamiento a más de 171 millones de metros cúbicos de aguas residuales por año, a partir de 76 plantas de tratamiento, de las cuales la PTAR León es la más grande en la entidad, pues tiene la capacidad de dar tratamiento a un caudal de 2.5 metros cúbicos por segundo, mediante un proceso de lodos primarios (CONAGUA, 2016). Se estima que anualmente la planta genera 11 mil 578 toneladas de lodo seco. Para los biosólidos, la propuesta es su reúso para fertilizar la superficie cosechada con cebada, cuya extensión es de más de 36 mil hectáreas y corresponde al Distrito de Riego Alto Río Lerma (CONAGUA, 2015). Para su fertilización anual, se estima que la superficie sembrada con cebada requiere 247 mil 655 toneladas de lodo seco. Los biosólidos generados por la PTAR León serían suficientes para fertilizar anualmente un 5% de tal superficie con los biosólidos que produce.

Tabla 24. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Guanajuato.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	76
Capacidad instalada (m ³ /s)	7.65
Caudal tratado (m ³ /s)	5.45
Producción de lodos estimada (t ST/año)	41,376.4
Plantas que tratan 1000 L/s	1
PTAR León	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	2.5
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.52
• Producción de lodos estimada (t ST/año)	11,577.8

Distritos de Riego	
Superficie total cultivada (ha)	162,780
Superficie total cosechada (ha)	162,780
Producción (Miles de toneladas)	1,488
DR011 Alto Río Lerma	
• Superficie cosechada (ha)	154,451
• Superficie cultivada (ha)	154,451
Cultivo Principal	
• Cebada (Riego Otoño-Invierno)	
○ Superficie cosechada (ha)	36,523
○ Superficie cultivada (ha)	36,523

La ruta de transporte del biosólido se presenta en la Figura 12. Se recorrería aproximadamente 100 kilómetros para transportar el material hacia el Distrito de Riego Alto Río Lerma.



Acotación	
■	DR011 Alto Río Lerma
●	PTAR León
—	Ruta de acarreo

Figura 12. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Guanajuato.

6.5.9 Guerrero

Un total de 61 plantas tratan anualmente un aproximado de 117 millones de metros cúbicos de aguas residuales en el estado de Guerrero. La PTAR Aguas Blancas, localizada en el municipio de Acapulco de Juárez, posee la capacidad de tratar un caudal de 1.35 metros cúbicos de agua residual por segundo mediante

un proceso de lodos activados (CONAGUA, 2016). Se estima que genera 10 mil 249 toneladas de lodo seco por año,

Se hace la propuesta de reutilizar el biosólido generado como fertilizante en el Distrito de Riego 105 Nexpa, ubicado en la misma entidad y cuya extensión es de poco menos de 4 mil hectáreas. Para obtener el mayor aprovechamiento del lodo se propone fertilizar tres superficies; dos cosechadas con maíz de grano, una de la temporada Otoño-Invierno y otra de la temporada Primavera-Verano, con una extensión de 697 y 324 hectáreas, respectivamente y una superficie cosechada con la especie zacate (búffel) verde perenne con una extensión de 856 hectáreas (CONAGUA, 2015). Entre las dos superficies cosechadas de maíz de grano se requiere para su fertilización anual aproximadamente 5 mil 187 toneladas de lodo seco y la superficie cosechada con zacate verde requiere 6 mil 515 toneladas. Con la producción anual de biosólidos de la PTAR Aguas Blancas sería posible fertilizar la totalidad de las cosechadas con maíz de grano y alrededor de un 78% de la superficie cosechada con zacate verde.

Tabla 25. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Guerrero.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	61
Capacidad instalada (m ³ /s)	4.4
Caudal tratado (m ³ /s)	3.72
Producción de lodos estimada (t ST/año)	28,249.8
Plantas que tratan 1000 L/s	1
PTAR Aguas Blancas	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.35
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.35
• Producción de lodos estimada (t ST/año)	10,249.2

Distritos de Riego	
Superficie total cultivada (ha)	24,947
Superficie total cosechada (ha)	24,857
Producción (Miles de toneladas)	377
DR105 Nexpa	
• Superficie cosechada (ha)	3,886
• Superficie cultivada (ha)	3,886
Cultivos Principales	
• Maíz grano (Riego Otoño-Invierno)	
○ Superficie cosechada (ha)	697
○ Superficie cultivada (ha)	697
• Maíz grano (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie cosechada (ha)	324
○ Superficie cultivada (ha)	324
• Zacate Verde (Riego Perenne)	
○ Superficie cosechada (ha)	856
○ Superficie cultivada (ha)	856

La distancia que se recorrería por el acarreo del biosólido es de aproximadamente unos 81 kilómetros. En la Figura 14 se muestra la ruta de acarreo propuesta.



Figura 13. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Guerrero.

6.5.10 Hidalgo

En el estado de Hidalgo se encuentra la planta de tratamiento de aguas residuales más representativa del país y considerada como la cuarta más grande en el mundo, la PTAR Atotonilco de Tula. Localizada en el ejido Conejos del municipio Atotonilco de Tula, abarca una extensión de cerca de 160 hectáreas y tiene como principal objetivo tratar el agua residual que proviene del Valle de México (CONAGUA, 2011). Tiene la capacidad de tratar un caudal de 23 metros cúbicos

por segundo mediante un proceso dual que combina procesos de lodos activados y lodos primarios avanzados. Se sabe que actualmente el caudal de agua residual que trata la planta es mediante el proceso de lodos activados y el caudal al que se le da tratamiento es de 9 metros cúbicos por segundo (CONAGUA, 2016).

Se estima que anualmente la PTAR Atotonilco de Tula genera 68 mil 328 toneladas de lodo seco. Los lodos producidos reciben un tratamiento que consiste en su espesamiento, digestión, deshidratación y finalmente se depositan en monorellenos en donde, con el transcurso de los años, pierden el resto del agua y pasan por un proceso adicional de sedimentación.

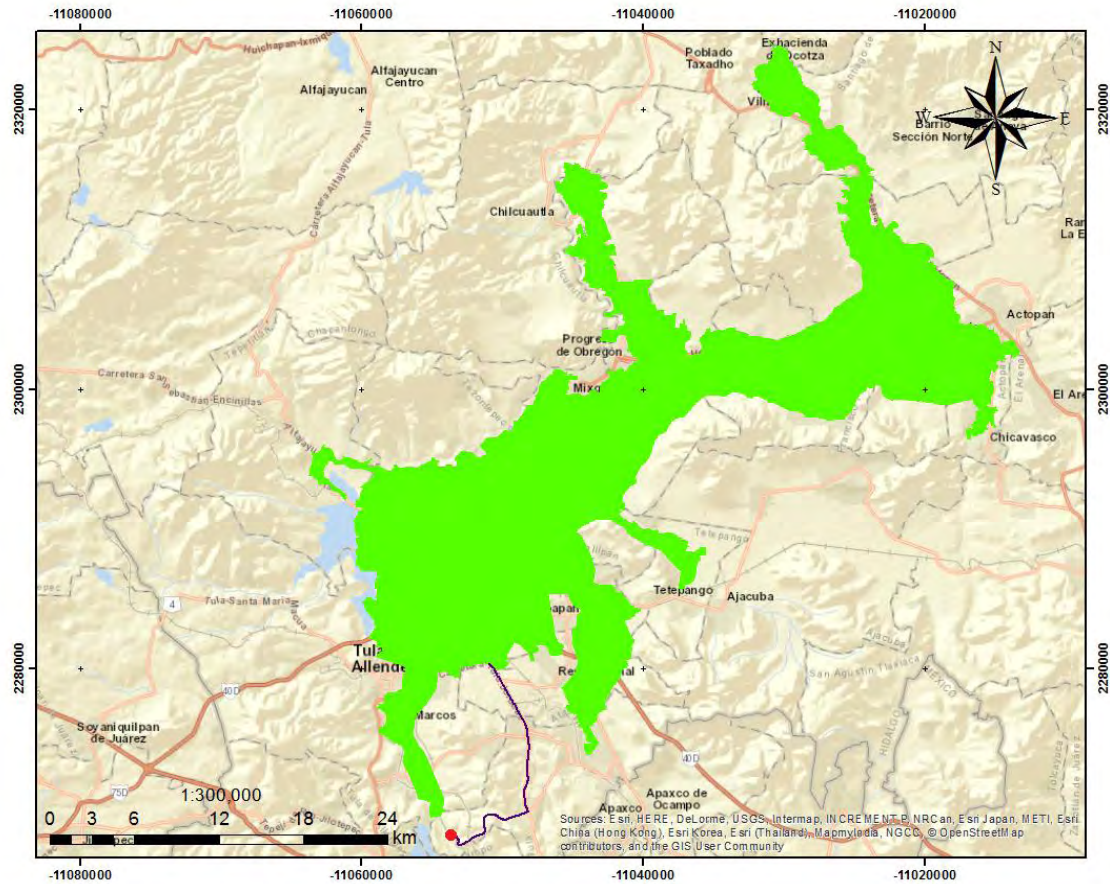
Las aguas residuales tratadas han beneficiado las actividades agrícolas del Distrito de Riego 003 Tula, mismo que podría beneficiarse además del contenido nutricional presente en los biosólidos que genera la PTAR Atotonilco de Tula. La propuesta de reuso del biosólido es fertilizar una superficie de 16 mil 172 hectáreas cosechada con maíz de grano en la temporada Primavera-Verano (CONAGUA, 2015). Para su fertilización anual se requerirá aplicar un estimado de 195 mil 530 toneladas de lodos secos, de modo que de tal superficie se conseguirá fertilizar un 35% de su extensión.

Tabla 26. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Hidalgo.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	38
Capacidad instalada (m ³ /s)	23.78
Caudal tratado (m ³ /s)	9.44
Producción de lodos estimada (t ST/año)	71,676.8
Plantas que tratan 1000 L/s	1
PTAR Atotonilco de Tula	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	23
• Caudal tratado (m ³ /s)	9
• Producción de lodos estimada (t ST/año)	68,328

Distritos de Riego	
Superficie total cultivada (ha)	96,122
Superficie total cosechada (ha)	96,122
Producción (Miles de toneladas)	4,618
DR003 Tula	
• Superficie cosechada (ha)	54,812
• Superficie cultivada (ha)	54,812
Cultivo Principal	
• Maíz grano (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie cosechada (ha)	16,172
○ Superficie cultivada (ha)	16,172

En la Figura 14 se muestra la ruta que se propone para el acarreo del lodo generado en la PTAR Atotonilco de Tula. El recorrido aproximado del transporte sería de 19 kilómetros.



Acotación	
■	DR005 Tula
●	PTAR Atotonilco de Tula
—	Ruta de acarreo

Figura 14. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Hidalgo.

6.5.11 Jalisco

Jalisco es la entidad en el país con el mayor tratamiento de aguas residuales municipales, registrando un caudal tratado de 11.7 metros cúbicos por segundo, a partir de 142 PTAR. Son tres las plantas con una capacidad instalada que supera el metro cúbico por segundo; la PTAR Agua Prieta, localizada en el municipio de Zapopan con la capacidad de tratar 8.5 metros cúbicos de agua residual por segundo, mediante procesos de lodos activados. La PTAR El Ahogado, ubicada

en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga con una capacidad instalada de 2.28 metros cúbicos por segundo y con un proceso de lodos activados. Y la PTAR SEAPAL Norte II que, mediante un proceso de lodos activados, tiene la capacidad de dar tratamiento a un caudal de 1.12 metros cúbicos de agua residual por segundo (CONAGUA, 2016).

En la PTAR de Agua Prieta se estima que la producción de lodo residual es de 45 mil 780 toneladas de lodo seco por año. El lodo residual recibe tratamiento a través de digestores anaerobios y es deshidratado para que posteriormente gran parte sea enviada a monorellenos (CEA, 2012).

Por su parte, la PTAR El Ahogado tiene una generación estimada de 15 mil 943 toneladas de lodo seco anuales.

El reúso de los biosólidos generados por ambas PTAR como fertilizantes para el Distrito de Riego 013 Estado de Jalisco es una opción que se propone para obtener su mejor aprovechamiento posible. El DR013 tiene una extensión que supera las 46 mil hectáreas y cuyo principal cultivo es el maíz de grano de la temporada Primavera-Verano con una superficie sembrada de 25 mil 565 hectáreas (CONAGUA, 2015). Se estima que para fertilizar anualmente tal superficie se requerirá de 148 mil 575 toneladas de lodo seco. La aportación de biosólido por parte de la PTAR El Ahogado y la PTAR Agua Prieta sería suficiente para fertilizar aproximadamente el 42% de la superficie.

En el municipio de Puerto Vallarta se localiza la PTAR SEAPAL Norte II que genera anualmente un estimado de 6 mil 757 toneladas de lodo seco. En este escenario, se propone fertilizar dos superficies que se siembran con arroz, una durante la temporada Otoño-Invierno y la otra en la temporada de Primavera-Verano, con una extensión de 893 y 881 hectáreas, respectivamente y correspondientes al DR093 Tomatlán (CONAGUA, 2015). De acuerdo con el requerimiento de nitrógeno de esta especie vegetal, se estima que se requeriría fertilizar anualmente la superficie cosechada en Otoño-Invierno con 4 mil 669 toneladas de lodo seco y la superficie cosechada en Primavera-Verano con 4 mil

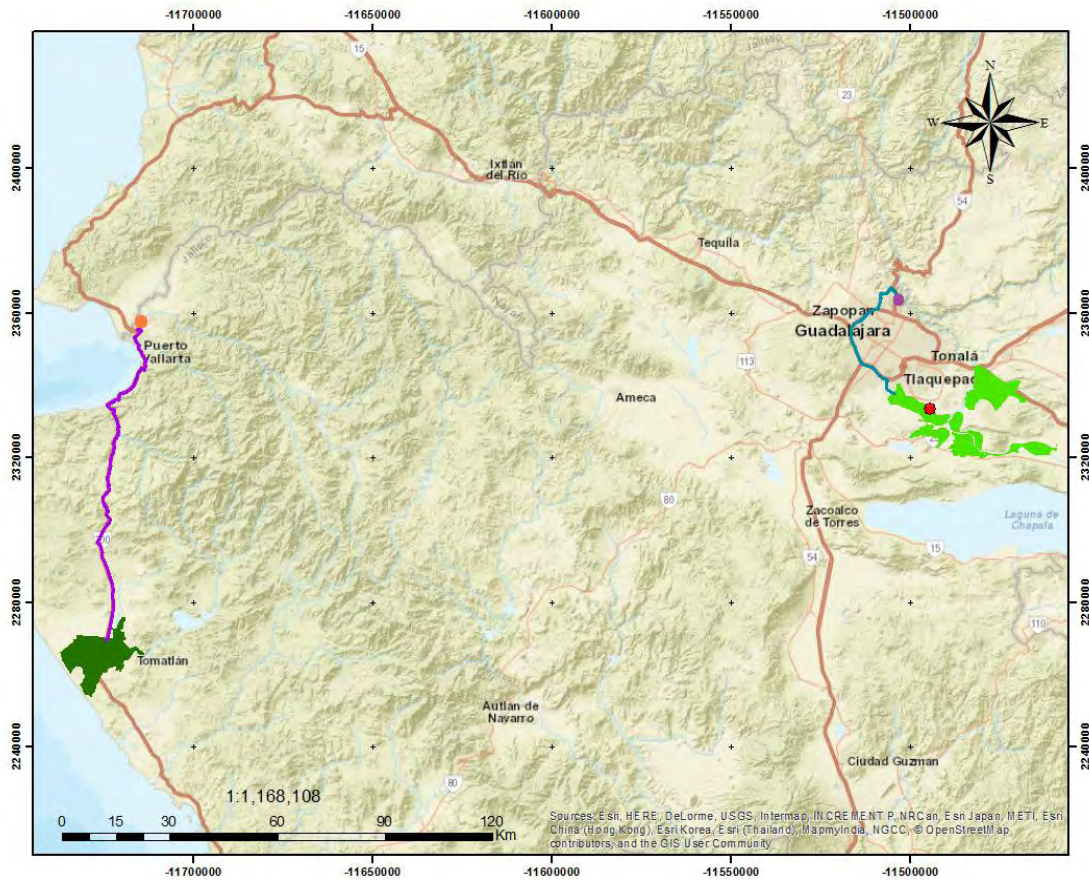
606 toneladas. Anualmente podría fertilizarse la totalidad de la primera superficie y un 45% de la segunda.

Tabla 27. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Jalisco.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	142
Capacidad instalada (m ³ /s)	15.19
Caudal tratado (m ³ /s)	11.7
Producción estimada de lodos (t ST/año)	88,849.2
Plantas con capacidad superior a 1,000 L/s	3
PTAR Agua Prieta	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	8.5
• Caudal tratado (m ³ /s)	6.03
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	45,779.8
PTAR El Ahogado	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	2.28
• Caudal tratado (m ³ /s)	2.1
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	15,943.2
PTAR SEAPAL Norte II	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.12
• Caudal tratado (m ³ /s)	0.89
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	6,756.9
Distritos de Riego	
Superficie total sembrada (ha)	72,214
Superficie total cosechada (ha)	70,345
Producción (Miles de toneladas)	2,619

DR013 Estado de Jalisco	
• Superficie sembrada (ha)	46,252
• Superficie cosechada (ha)	46,252
Cultivos principales	
• Maíz grano (Temporal Primavera-Verano)	
○ Superficie sembrada (ha)	25,565
○ Superficie sembrada (ha)	25,565
DR093 Tomatlán	
• Superficie sembrada (ha)	10,872
• Superficie cosechada (ha)	10,440
Cultivos principales	
• Arroz (Riego Otoño-Invierno)	
○ Superficie sembrada (ha)	893
○ Superficie sembrada (ha)	893
• Arroz (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie sembrada (ha)	881
○ Superficie sembrada (ha)	881

Las rutas para el acarreo de los biosólidos que se proponen se muestran en la Figura 15. Para el transporte de lodos de la PTAR Agua Prieta hacia el DR013, la distancia recorrida se estima de 46 kilómetros. Por su parte, la PTAR El Ahogado se localiza sobre la extensión del Distrito de Riego Estado de Jalisco, de modo que no se trazó una ruta específica. Para el caso del transporte del biosólido proveniente de la PTAR SEAPAL Norte II hacia el Distrito de Riego Tomatlán, la distancia recorrida se estima de 111 kilómetros.



Acotación	
■	DR013 Estado de Jalisco
●	PTAR Agua Prieta
—	Ruta de acarreo PTAR Toluca Norte - DR013
●	PTAR El Ahogado
●	PTAR SEAPAL Norte II
■	DR093 Tomatlán
—	Ruta de acarreo PTAR SEAPAL Norte II y Sur al DR093

Figura 15. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Jalisco.

6.5.12 Michoacán

En Michoacán se registran 37 plantas de tratamiento de aguas residuales, de las cuales, la PTAR Morelia es la más representativa de la entidad pues tiene la capacidad de tratar un caudal de 1.2 metros cúbicos de agua residual por segundo, a partir de un proceso de lodos activados (CONAGUA, 2016). Se estima que al año la planta de tratamiento genera 8 mil 351 toneladas de lodo seco.

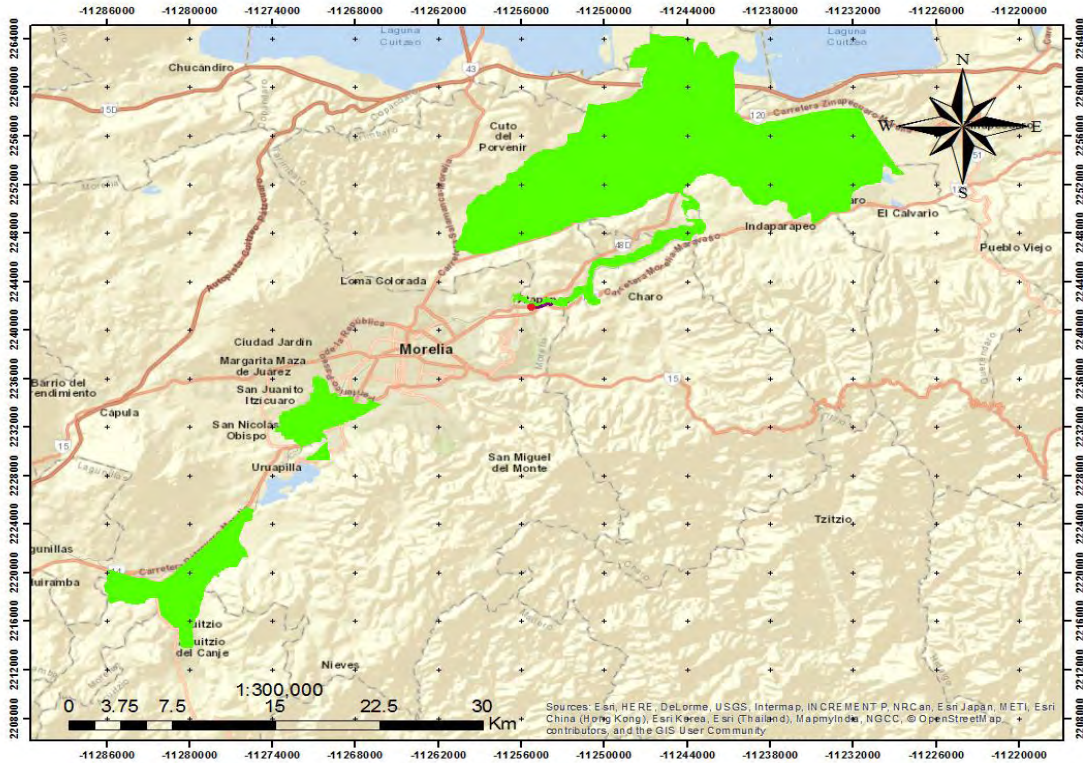
Cercana a la PTAR Morelia se encuentra el Distrito de Riego 020 Morelia que se extiende por más de 18 mil hectáreas. Como alternativa para reutilizar los biosólidos que genera la PTAR Morelia se propone la fertilización anual de una superficie de 7 mil 469 hectáreas cosechadas con maíz de grano, correspondiente al DR020 (CONAGUA, 2015). Se ha estimado que una cantidad de 47 mil 277 toneladas de lodo seco serían requeridas para lograr fertilizar tal superficie en un año. Tomando en cuenta la cantidad de biosólidos que la PTAR Morelia genera al año se determina que cerca del 18% de la superficie sería fertilizada.

Tabla 28. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Michoacán.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	37
Capacidad instalada (m ³ /s)	4.09
Caudal tratado (m ³ /s)	3.34
Producción de lodos estimada (t ST/año)	25,372.46
Plantas que tratan 1000 L/s	1
PTAR Morelia	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.2
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.1
• Producción de lodos estimada (t ST/año)	8,351.2

Distritos de Riego	
Superficie total cultivada (ha)	208,968
Superficie total cosechada (ha)	208,898
Producción (Miles de toneladas)	2,801
DR020 Morelia	
• Superficie cosechada (ha)	18,222
• Superficie cultivada (ha)	18,222
Cultivo Principal	
• Maíz grano (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie cosechada (ha)	7,469
○ Superficie cultivada (ha)	7,469

En la Figura 16 se muestra la localización de la PTAR Morelia y la extensión del Distrito de Riego 020 Morelia, así como la ruta para el acarreo del lodo que se propone, la cual es considerablemente corta, de 2 kilómetros.



Acotación	
■	DR020 Morelia
●	PTAR Morelia
—	Ruta de acarreo

Figura 16. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Morelia.

6.5.13 Nuevo León

Nuevo León es el segundo estado del país con el mayor caudal tratado de aguas residuales municipales. Cuenta con 52 PTAR, de las cuales destacan 3 por tener la capacidad de tratar un caudal superior a los 1000 litros por segundo.

Ubicada en el antiguo camino a Agua Fría, en el municipio de Apodaca, la PTAR Noreste tiene la capacidad de dar saneamiento a mil 875 litros por segundo de aguas residuales. Su tratamiento consiste inicialmente en un pre tratamiento de bombeo del influente, rejillas y desarenadores, seguido de un proceso secundario

de lodos activados y la desinfección del efluente (SADM, 2011). Se estima que del tratamiento de aguas residuales se producen más de 9 mil toneladas de lodo seco que, posterior a su estabilización, tendría las características aptas para fertilizar diversas cosechas pertenecientes al Distrito de Riego 031 Las Lajas. La producción anual de biosólidos de la PTAR Noreste sería suficiente para fertilizar en su totalidad superficies sembradas con sorgo de grano de mil 189 hectáreas, con sorgo forrajero verde de 142 hectáreas, con maíz de grano de 123 hectáreas y con soya industrial de 125 hectáreas, además para fertilizar un 80% de una superficie sembrada con zacate verde de 205 hectáreas.

En el municipio de General Escobedo se encuentra localizada la PTAR Norte, la cual inició operaciones en el año 1995. Actualmente tiene capacidad de tratar un caudal de 3 mil litros por segundo de aguas residuales que pasan inicialmente por un pre tratamiento de bombeo del influente, rejillas y desarenadores, para continuar con una sedimentación primaria, posteriormente pasa por un proceso secundario de lodos activados y finalmente el efluente para por su desinfección (SADM, 2011). De tratamiento mencionado se ha estimado una generación de 18 mil 175 toneladas de lodos secos que, después de ser estabilizados, se propone ser reusados para fertilizar una superficie cosechada con trigo de grano y una superficie cosechada con sorgo de grano, cada una con una extensión de 2 mil 696 y 2 mil 617 hectáreas, respectivamente y correspondientes al Distrito de Riego 004 Don Martín. Los biosólidos de la PTAR Norte son suficientes para fertilizar totalmente la superficie de trigo de grano y para fertilizar aproximadamente el 45% de la superficie de sorgo de grano.

La PTAR Dulces Nombres es considerada como la tercera más grande en el país, se encuentra localizada en el municipio de Pesquería, al noreste de Monterrey, ciudad para la cual su labor de saneamiento de aguas residuales es fundamental. Tiene la capacidad de dar un tratamiento a 673 mil 920 metros cúbicos diarios mediante un pre-tratamiento de rejillas, bombeo del influente y desarenadores, para continuar con una sedimentación primaria, posteriormente, un proceso secundario de lodos activados y finalmente la desinfección del influente (SADM,

2011). A partir de dicho tratamiento se estima que se generan más de 47 mil toneladas de lodo seco al año que son estabilizados en digestores anaerobios y posteriormente son enviados a monorellenos ubicados en terrenos adyacentes a la planta. Se proponer reutilizar los biosólidos de la PTAR Dulces Nombres como un fertilizante, pero debido a que el estado de Nuevo León cuenta con una limitada superficie de Distritos de Riego para fertilizar, se propone que sean enviados al Distrito de Riego 026 Bajo Río San Juan ubicado en Tamaulipas por ser el distrito relativamente más cercano. De aquí se busca fertilizar una superficie cosechada con sorgo de grano de 29 mil 500 hectáreas, que, de acuerdo a los requerimientos de nitrógeno del cultivo y a las características del biosólido se estima que será posible fertilizar anualmente el 23% de la superficie.

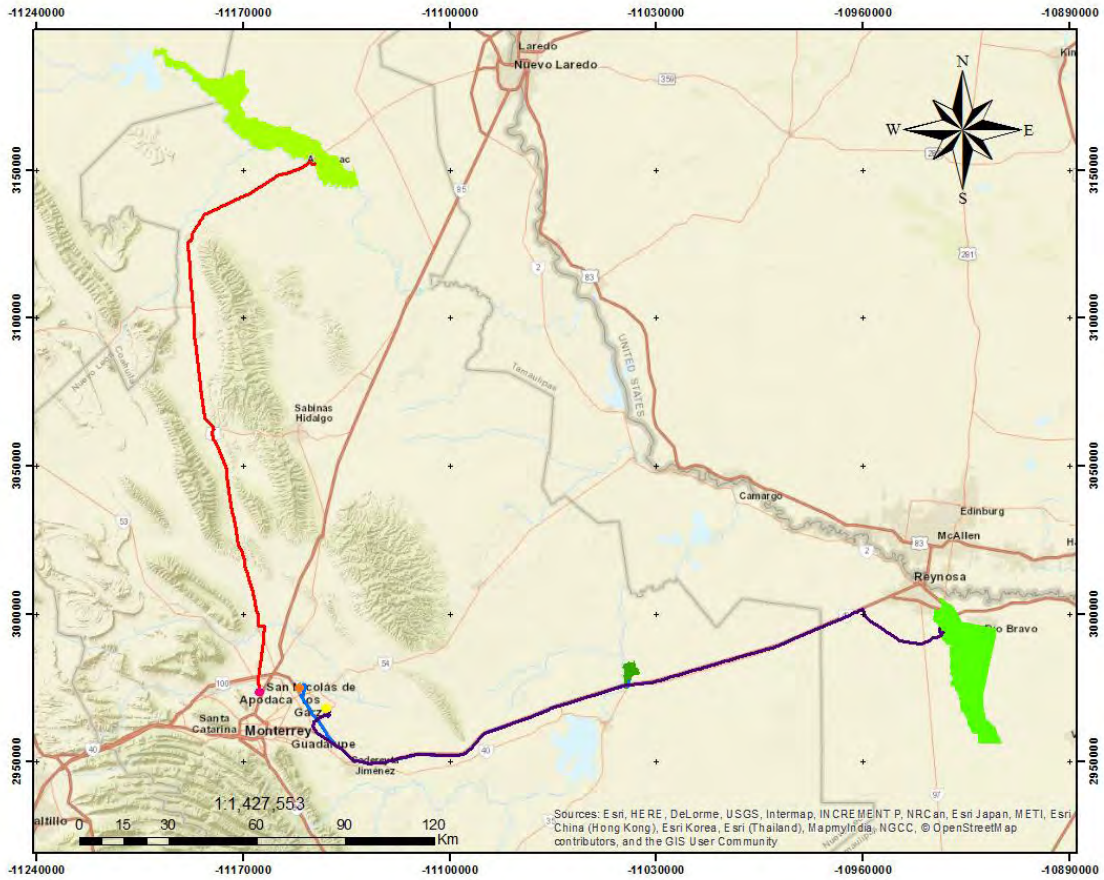
Tabla 29. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Nuevo León.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	52
Capacidad instalada (m ³ /s)	14.61
Caudal tratado (m ³ /s)	11.23
Producción de lodos estimada (t ST/año)	85,258.16
Plantas que tratan 1000 L/s	3
PTAR Dulces Nombres	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	7.5
• Caudal tratado (m ³ /s)	6.27
• Producción de lodos estimada (t ST/año)	47,601.84
PTAR Norte	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	3
• Caudal tratado (m ³ /s)	2.39
• Producción de lodos estimada (t ST/año)	18,175.25

PTAR Noreste	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.87
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.24
• Producción de lodos estimada (t ST/año)	9,421.67
Distritos de Riego	
Superficie total cultivada (ha)	10,997
Superficie total cosechada (ha)	10,992
Producción (Miles de toneladas)	98
DR026 Bajo Río San Juan	
• Superficie cosechada (ha)	71,481
• Superficie cultivada (ha)	71,391
Cultivo Principal	
• Sorgo grano (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie cosechada (ha)	29,500
○ Superficie cultivada (ha)	29,500
DR004 Don Martín	
• Superficie cosechada (ha)	9,049
• Superficie cultivada (ha)	9,049
Cultivo Principal	
• Trigo grano (Riego Otoño-Invierno)	
○ Superficie cosechada (ha)	2,696
○ Superficie cultivada (ha)	2,696
• Sorgo grano (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie cosechada (ha)	2,617
○ Superficie cultivada (ha)	2,617
DR031 Las Lajas	
• Superficie cosechada (ha)	1,948
• Superficie cultivada (ha)	1,943
Cultivo Principal	
• Sorgo grano (Riego Primavera-Otoño)	

○ Superficie cosechada (ha)	1,189
○ Superficie cultivada (ha)	1,189
● Sorgo forrajero verde (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie cosechada (ha)	142
○ Superficie cultivada (ha)	142
● Soya Industrial (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie cosechada (ha)	125
○ Superficie cultivada (ha)	125
● Maíz grano (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie cosechada (ha)	123
○ Superficie cultivada (ha)	123
● Zacate Verde (Riego Perenne)	
○ Superficie cosechada (ha)	205
○ Superficie cultivada (ha)	205

En la Figura 17 se muestran las rutas de acarreo de biosólidos propuestas para las PTAR analizadas de Nuevo León. La distancia que se deberá recorrer de la PTAR Noreste al Distrito de Riego 031 Las Lajas se calcula de 138 kilómetros. El transporte de biosólidos de la PTAR Norte hacia el Distrito de Riego 004 Don Martín sería de aproximadamente 212 kilómetros. Y la ruta propuesta para el acarreo de biosólidos de la PTAR Dulces Nombres al Distrito de Riego 026 Bajo Río San Juan es de aproximadamente 247 kilómetros.





Acotación	
	DR004 Don Martín
	PTAR Norte
	Ruta de acarreo PTAR Norte - DR004
	DR031 Las Lajas
	PTAR Noreste
	Ruta de acarreo PTAR Noreste – DR031
	DR026 Bajo Río San Juan
	PTAR Dulces Nombres
	Ruta de acarreo PTAR Dulces Nombres – DR026

Figura 17. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Nuevo León.

6.5.14 Puebla

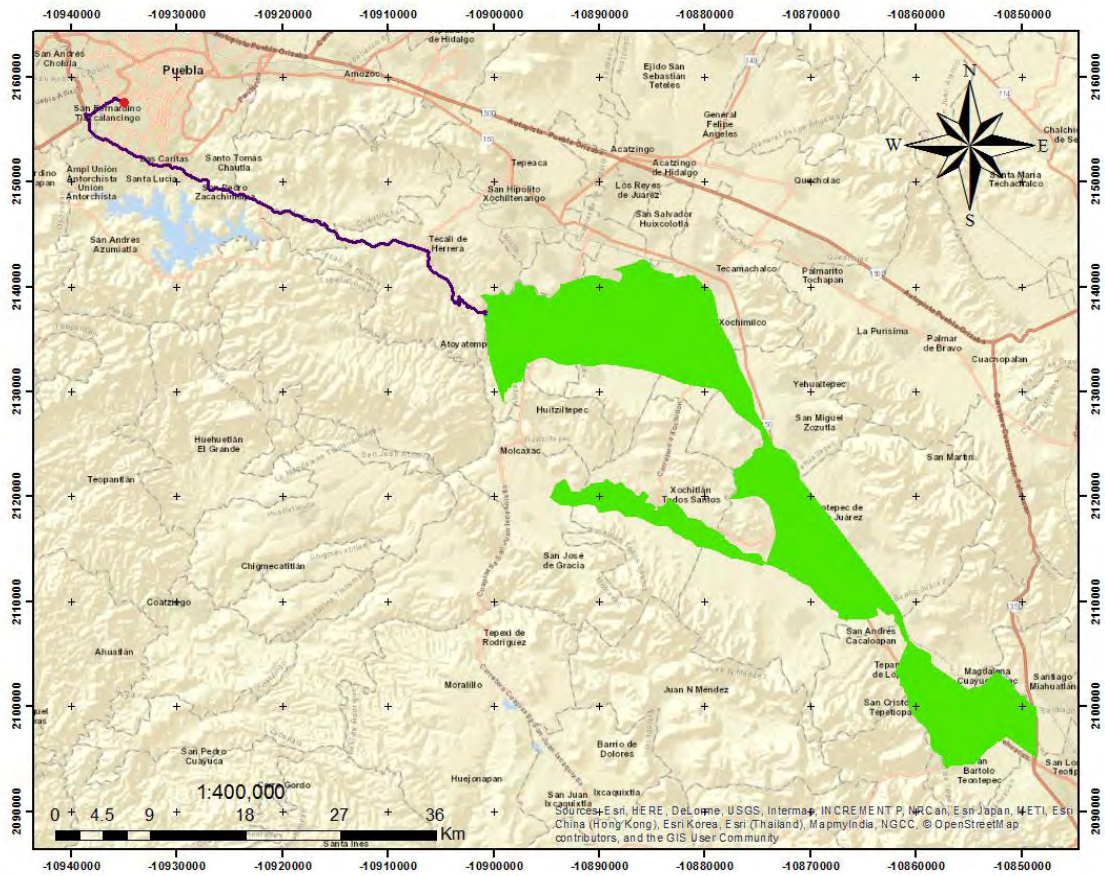
El estado de Puebla cuenta con 78 PTAR que dan saneamiento a más de 111 millones de metros cúbicos anuales de las aguas residuales municipales generadas por la entidad. En el municipio de Puebla se ubica la PTAR San Francisco Puebla que cuenta con un proceso de lodos primarios avanzado y tiene capacidad para tratar un caudal de 1.1 metros cúbicos al año (CONAGUA, 2016). El tratamiento de aguas residuales implica una generación estimada de 9 mil 809 toneladas de lodos secos al año. La cantidad de biosólidos generados por la planta de tratamiento puede ser aprovechada por sus características para fertilizar una superficie sembrada con maíz de grano, con una extensión mayor a las 15 mil hectáreas y perteneciente al Distrito de Riego 030 Valsequillo (CONAGUA, 2015). Conseguir fertilizar tal superficie en un año requerirá de aproximadamente 146 mil 811 toneladas de lodo seco. De esta manera la aportación de biosólidos de la PTAR Puebla San Francisco sería suficiente para fertilizar cerca del 7% de la siembra.

Tabla 30. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Puebla.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	78
Capacidad instalada (m ³ /s)	3.42
Caudal tratado (m ³ /s)	3.53
Producción de lodos estimada (t ST/año)	26,814.94
Plantas que tratan 1000 L/s	1
PTAR Puebla San Francisco	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.1
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.29
• Producción de lodos estimada (t ST/año)	9,808.86

Distritos de Riego	
Superficie total cultivada (ha)	21,322
Superficie total cosechada (ha)	21,322
Producción (Miles de toneladas)	407
DR030 Valsequillo	
• Superficie cosechada (ha)	21,322
• Superficie cultivada (ha)	21,322
Cultivo Principal	
• Maíz grano (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie cosechada (ha)	15,111
○ Superficie cultivada (ha)	15,111

El acarreo del lodo sería mediante la ruta que se propone en la Figura 18 y se estima que se recorrerá una distancia de aproximadamente 56 kilómetros.



Acotación	
■	DR030 Valsequillo
●	PTAR Puebla San Francisco
—	Ruta de acarreo

Figura 18. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Puebla.

6.5.15 Sinaloa

En el estado de Sinaloa hay registradas 256 plantas de tratamiento de agua residual, de las cuales se analizó la PTAR Culiacán Norte, cuya capacidad instalada es de 1.7 metros cúbicos de agua residual por segundo y cuenta con un proceso de lodos activados (CONAGUA, 2016). A partir del saneamiento de aguas

residuales se estima que la planta genera 11 mil 638 toneladas de lodo seco por año.

En cuanto a su situación agrícola, Sinaloa es el estado con la mayor superficie de Distritos de Riego sembrada, siendo de 832 mil 179 hectáreas.

Ante la alternativa de reuso como fertilizantes de los biosólidos generados por la PTAR Culiacán Norte, se seleccionó el Distrito de Riego 010 Culiacán-Humaya como el destino más conveniente. Para tal distrito se consideró el sorgo de grano como su principal cultivo, mismo que es cosechado en la temporada Otoño-Invierno en una superficie de más de 21 mil hectáreas (CONAGUA, 2015). Se estimó que para su fertilización anual la superficie requerirá más de 241 mil toneladas de lodo seco. De esta manera, los lodos provenientes de la PTAR Culiacán Norte lograrían fertilizar, un 5% de la superficie de sorgo de grano.

Tabla 31. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Sinaloa.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	256
Capacidad instalada (m ³ /s)	6.7
Caudal tratado (m ³ /s)	5.36
Producción de lodos estimada (t ST/año)	40,693.1
Plantas que tratan 1000 L/s	1
PTAR Culiacán Norte	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.7
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.53
• Producción de lodos estimada (t ST/año)	11,638.5
Distritos de Riego	
Superficie total cultivada (ha)	4,185
Superficie total cosechada (ha)	4,185
Producción (Miles de toneladas)	84

DR010 Culiacán-Humaya	
• Superficie cosechada (ha)	220,597
• Superficie cultivada (ha)	218,176
Cultivo Principal	
• Sorgo grano (Riego Otoño-Invierno)	
○ Superficie cosechada (ha)	21,119
○ Superficie cultivada (ha)	21,111

En la Figura 19 se muestra la localización de la PTAR Culiacán Norte, la cual se encuentra dentro de la extensión que abarca el Distrito de Riego 010 Culiacán-Humaya. Por tal razón no se propuso una ruta específica para este caso de estudio.

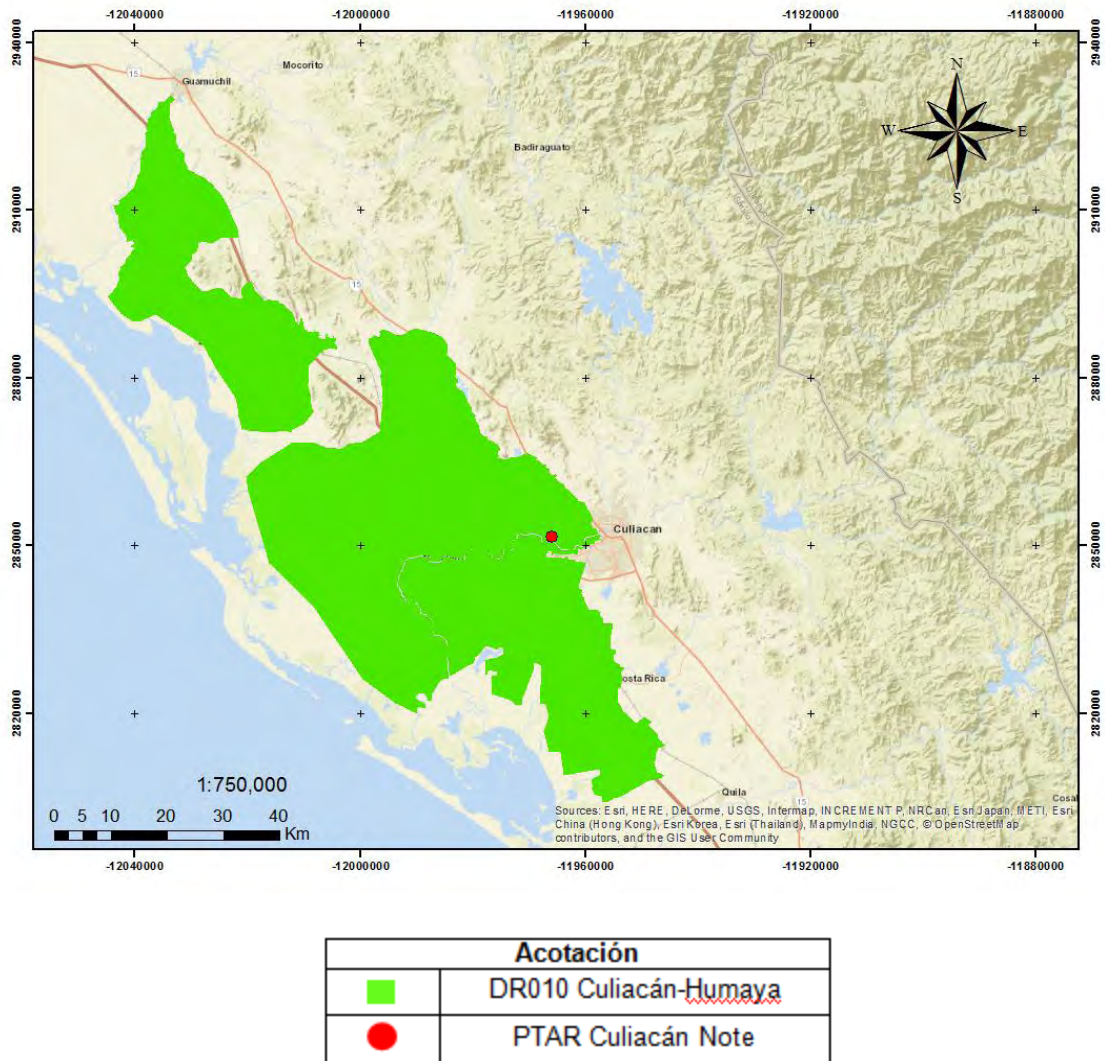


Figura 19. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Sinaloa.

6.5.16 San Luis Potosí

En San Luis Potosí 43 plantas de tratamiento de agua residual dan saneamiento anualmente a más de 67 millones de metros cúbicos de aguas residuales (CONAGUA, 2016). Para su estudio, fue seleccionada la PTAR Tanque Tenorio que se encuentra localizada en el municipio de San Luis Potosí y que, mediante un proceso inicial de lodos primarios avanzados, es capaz de tratar un caudal de

1.05 metros cúbicos por segundo de agua residual. Del efluente del tratamiento primario avanzado, 600 litros por segundo se destinan para el riego agrícola de 490 hectáreas y 450 litros por segundo son enviados a un proceso de tratamiento secundario avanzado para su reúso industrial en las torres de enfriamiento de la Termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad, ubicada en Villa de Reyes (CEA, 2003). Del tratamiento de lodos se estima una generación anual de 7 mil 592 toneladas de lodo seco.

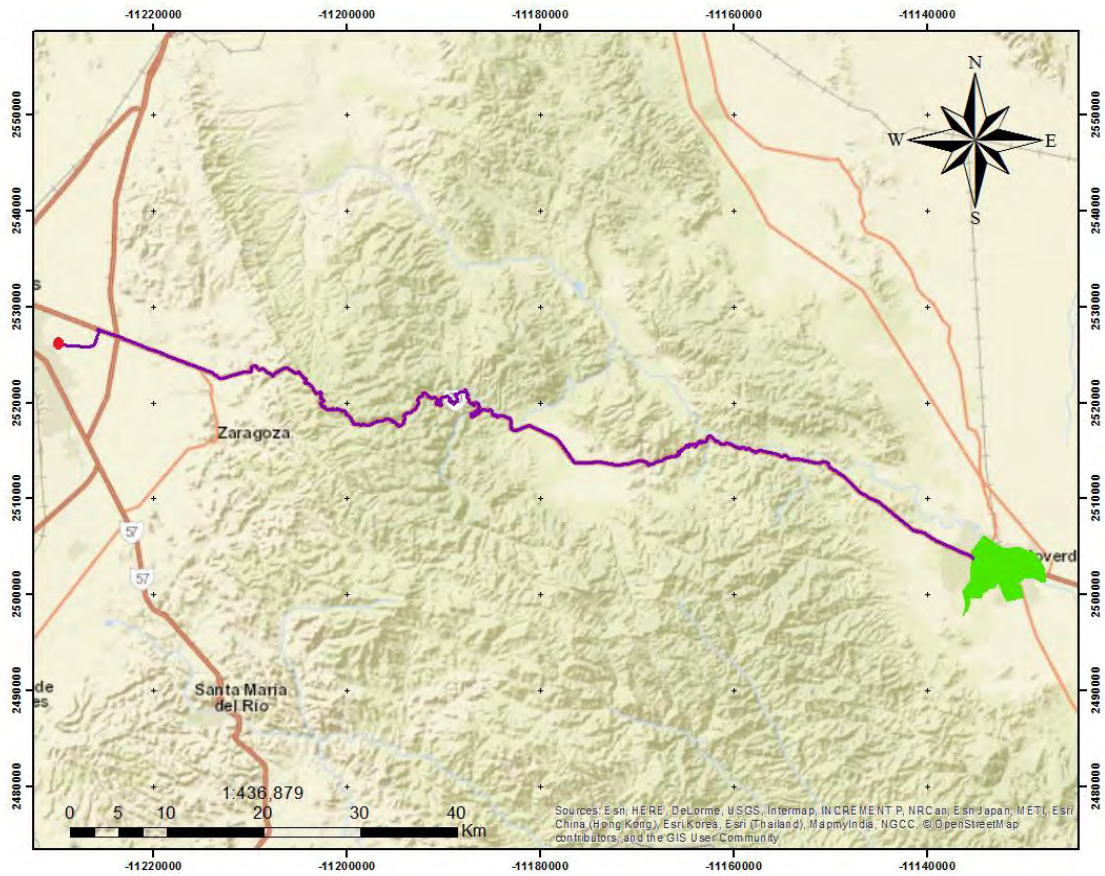
Ante este escenario, la propuesta para el reúso de los biosólidos de la PTAR Tanque Tenorio es fertilizar una superficie de 797 hectáreas de maíz elotero, correspondientes al Distrito de Riego 049 Río Verde (CONAGUA, 2015). En base a los requerimientos de nitrógeno del cultivo se estima que para fertilizar anualmente la superficie, se requerirá adicionar 9 mil 717 toneladas de lodo seco, de modo que los biosólidos producidos por la PTAR Tanque Tenorio serán suficientes para fertilizar al año cerca del 78% de la superficie de maíz elotero.

Tabla 32. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Tamaulipas.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	43
Capacidad instalada (m ³ /s)	2.58
Caudal tratado (m ³ /s)	2.14
Producción de lodos estimada (t ST/año)	16,269.7
Plantas que tratan 1000 L/s	1
PTAR Tanque Tenorio	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.05
• Caudal tratado (m ³ /s)	1
• Producción de lodos estimada (t ST/año)	7,592

Distritos de Riego	
Superficie total cultivada (ha)	80,226
Superficie total cosechada (ha)	79,042
Producción (Miles de toneladas)	981
DR049 Río Verde	
• Superficie cosechada (ha)	2,854
• Superficie cultivada (ha)	2,854
Cultivo Principal	
• Maíz elotero (Riego Primavera-Verano)	
○ Superficie cosechada (ha)	797
○ Superficie cultivada (ha)	797

La ruta de acarreo de los biosólidos provenientes de la PTAR Tanque Tenorio que se propuso se muestra en la Figura 20, Se estima que en el transporte del material se recorrería una distancia estimada de 127 kilómetros.



Acotación	
■	DR049 Río Verde
●	PTAR Tanque Tenorio
—	Ruta de acarreo

Figura 20. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de San Luis Potosí.

6.5.17 Tamaulipas

En Tamaulipas 40 PTAR se encargan del saneamiento de aguas residuales municipales, mismas que por año tratan un caudal cercano a los 170 millones de metros cúbicos. Las tres PTAR analizadas en esta entidad son; la PTAR Tierra Negra, la PTAR Nuevo Laredo y la PTAR Reynosa I (CONAGUA, 2016).

La PTAR Tierra Negra, localizada en el municipio de Ciudad Madero, tiene una labor importante en el saneamiento de las aguas residuales provenientes de las áreas conurbadas de Tampico, Madero y Altamira. A partir de un proceso de lodos activados, la planta tiene capacidad para tratar un caudal de 1.8 metros cúbicos por segundo.

Subsecuente al saneamiento de aguas residuales se estima que la planta genera anualmente 9 mil 110 toneladas de lodo seco, las cuales son tratadas mediante digestión anaerobia y deshidratadas con centrifugas (Palomares, 2015). Por las características del biosólido tratado se propone que se dé su aprovechamiento como fertilizante en las actividades agrícolas del Distrito de Riego 092 A Río Pánuco-U. Para este distrito se seleccionó como cultivo principal el sorgo de grano sembrado en la temporada Otoño-Invierno y que abarca una extensión superior a las 10 mil hectáreas (CONAGUA, 2015). Se estima que para su fertilización anual, la superficie de sorgo de grano requeriría de 34 mil 630 toneladas de lodo seco. Así la aportación de biosólidos de la PTAR Tierra Negra será la suficiente para fertilizar al año un 26% de la superficie.

La PTAR de Nuevo Laredo es capaz de dar saneamiento a un caudal diario de 1.36 metros cúbicos de aguas residuales por segundo a partir de un proceso de lodos activados. Al año se estima que del tratamiento de aguas se generan 6 mil 795 toneladas de lodos secos. En el mismo municipio y, justo en la localización de la planta, se extienden los cultivos correspondientes al Distrito de Riego 050 Acuña-Falcón, cuya extensión es superior a las 2 mil hectáreas. Ante este escenario se propone reutilizar los biosólidos de la PTAR Nuevo Laredo para fertilizar una superficie de 494 hectáreas que es sembrada en la temporada Otoño-Invierno con sorgo forrajero verde (CONAGUA, 2015). Partiendo de los requerimientos de nitrógeno del cultivo se estimó la cantidad requerida para fertilizar la superficie anualmente, siendo esta de 10 mil 294 toneladas de lodos secos. Los biosólidos generados anualmente por la PTAR Nuevo Laredo alcanzarían a fertilizar un 66% de la superficie cosechada con sorgo forrajero verde.

En el municipio de Reynosa se localiza la PTAR Reynosa I con capacidad para dar saneamiento en la región a un caudal de 1 metro cúbico de aguas residuales por segundo, a partir de un proceso de lodos activados. Tras el tratamiento se genera un estimado de 6 mil 453 toneladas de lodos secos anuales. Cercano a la PTAR, se localiza el Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo cuya extensión es superior a 198 mil hectáreas. El sorgo de grano cultivado en la temporada Primavera-Verano es el cultivo principal del distrito con una superficie cosechada de más de 11 mil hectáreas (CONAGUA, 2015). Sin embargo para este estudio se seleccionó la superficie sembrada con sorgo de grano de temporal Primavera-Verano, con una superficie cosechada de 11 mil 598 hectáreas, esto con la finalidad de aprovechar mejor los biosólidos y cubrir una mayor región de superficie. De acuerdo con los requerimientos nutrimentales del sorgo de grano, se requeriría anualmente 71 mil 828 toneladas de lodo seco, de modo que sería posible fertilizar un 9% de la superficie seleccionada.

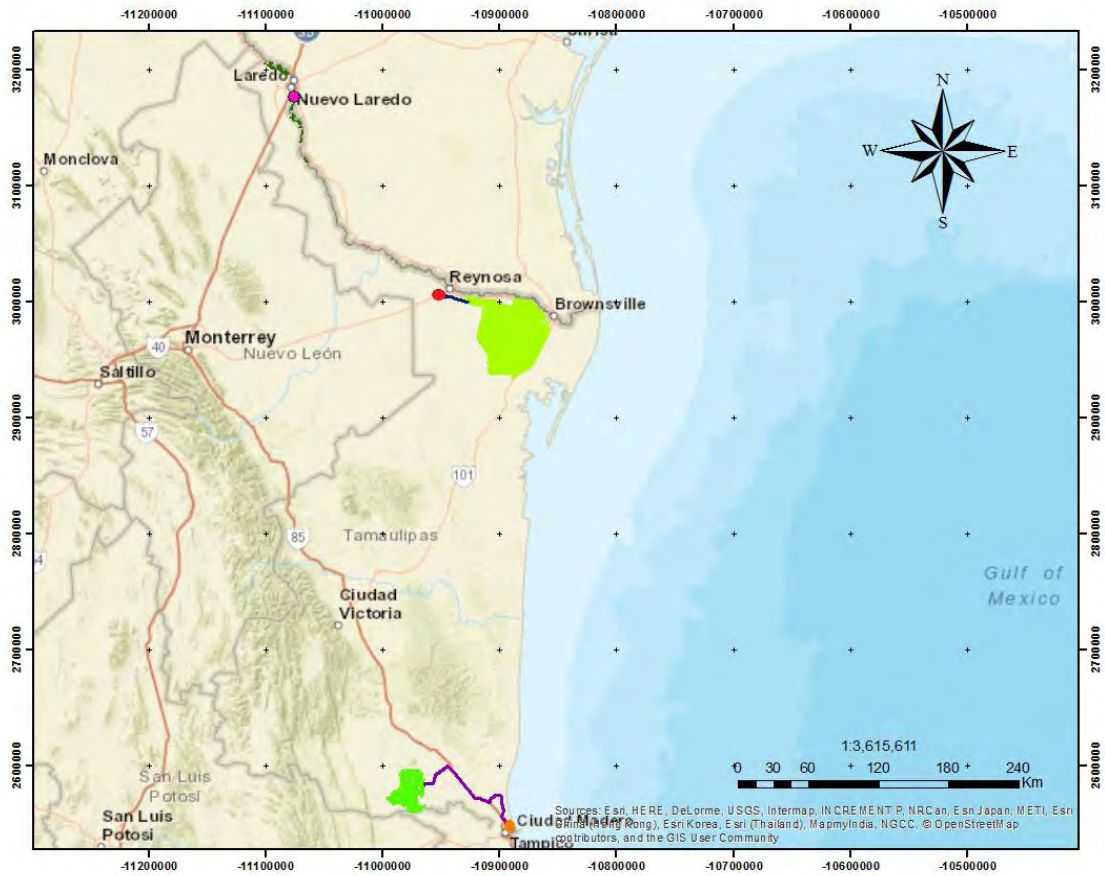
Tabla 33. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Tamaulipas.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	40
Capacidad instalada (m ³ /s)	7.84
Caudal tratado (m ³ /s)	5.39
Producción estimada de lodos (t ST/año)	40,936.1
Plantas con capacidad superior a 1,000 L/s	3
PTAR Tierra Negra	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.8
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.2
• Producción estimada de lodos (tST/año)	9,110.4

PTAR Nuevo Laredo	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.36
• Caudal tratado (m ³ /s)	0.895
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	6,794.84
PTAR Reynosa I	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1
• Caudal tratado (m ³ /s)	0.85
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	6,453.2
Distritos de Riego	
Superficie total sembrada (ha)	362,287
Superficie total cosechada (ha)	360,436
Producción (Miles de toneladas)	4,067
DR092A Río Pánuco-U, Las Animas	
• Superficie cosechada (ha)	37,388
• Superficie cultivada (ha)	37,378
Cultivos principales	
• Sorgo grano (Riego Otoño-Invierno)	
○ Superficie cosechada (ha)	10,202
○ Superficie cultivada (ha)	10,202
DR050 Acuña-Falcón	
• Superficie cosechada (ha)	2,320
• Superficie cultivada (ha)	2,320
Cultivos principales	
• Sorgo forrajero verde (Riego Otoño-Invierno)	
○ Superficie cosechada (ha)	494
○ Superficie cultivada (ha)	494
DR025 Bajo Río Bravo	
• Superficie cosechada (ha)	198,366
• Superficie cultivada (ha)	198,360

Cultivos principales	
<ul style="list-style-type: none"> • Sorgo grano (Temporada Primavera-Verano) <ul style="list-style-type: none"> ○ Superficie cosechada (ha) ○ Superficie cultivada (ha) 	 11,598 11,598

En la Figura 21 se muestran las rutas del acarreo de biosólidos de cada una de las PTAR analizadas en Tamaulipas. Para el caso de la PTAR Nuevo Laredo no se trazó una ruta ya que esta se encuentra dentro de la superficie del Distrito de Riego Acuña-Falcón, destino propuesto para este caso. La distancia recorrida por el acarreo de los lodos de la PTAR Tierra Negra es de aproximadamente 123 kilómetros. El acarreo del biosólido proveniente de la PTAR Reynosa I es de 21 kilómetros de distancia.











Acotación	
	DR092A Río Pánuco-U
	PTAR Tierra Negra
	Ruta de Acarreo PTAR Tierra Negra - DR092A
	DR050 Acuña-Falcón
	PTAR Nuevo Laredo
	DR025 Bajo Río Bravo
	PTAR Reynosa I
	Ruta de Acarreo PTAR Reynosa I – Bajo Río Bravo

Figura 21. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Tamaulipas.

6.5.18 Veracruz

El Estado de Veracruz cuenta con 118 plantas de tratamiento de aguas residuales que dan un saneamiento a más de 181 millones de metros cúbicos de aguas residuales. En el municipio de Veracruz se localiza la PTAR Playa Norte que, mediante un tratamiento de filtros biológicos, trata un caudal de 1.6 metros cúbicos de agua residual por segundo y genera por año un estimado de 12 mil 147 toneladas de lodo seco (CONAGUA, 2016).

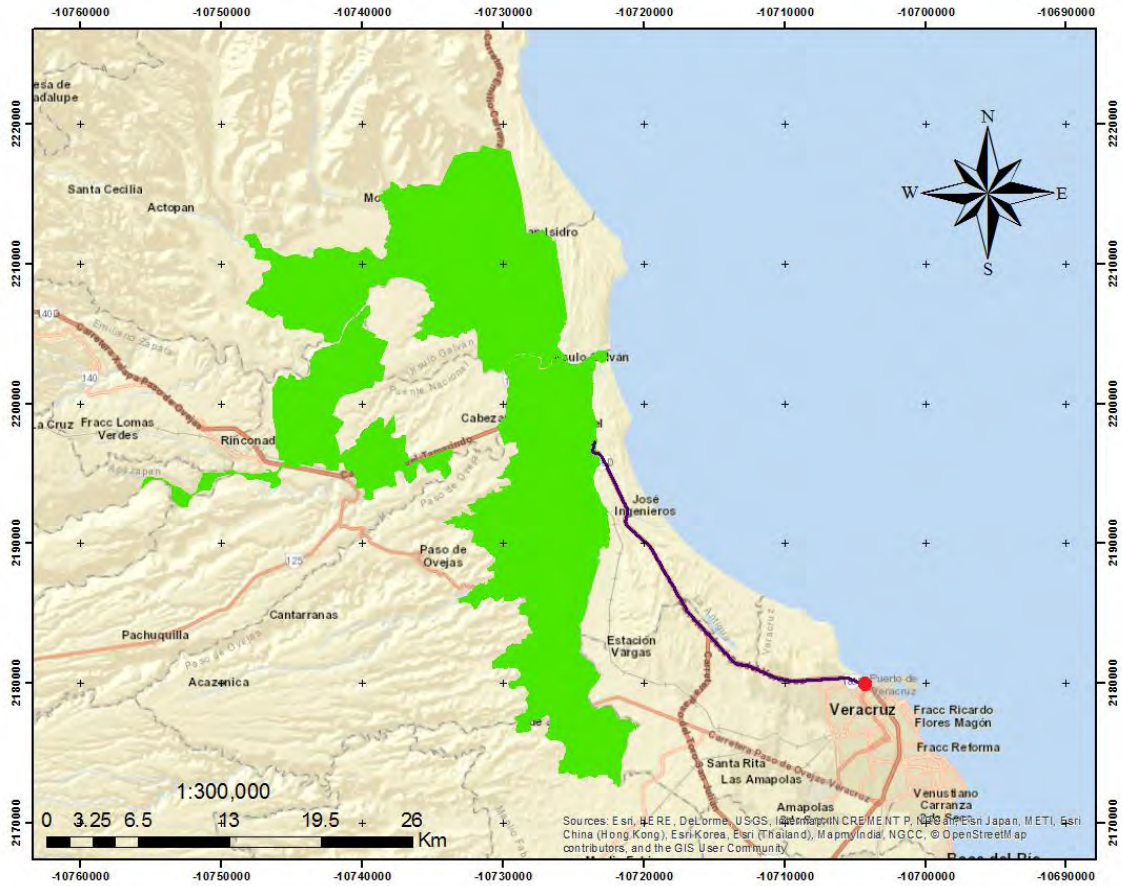
Dentro del Estado de Veracruz se localiza el Distrito de Riego 035 La Antigua, con una extensión que supera las 22 mil hectáreas. La caña de azúcar es el cultivo predominante en el Distrito de Riego respecto a su extensión, siendo esta cercana a las 19 mil hectáreas (CONAGUA, 2015). Para fertilizar la superficie anualmente se propone enviar los biosólidos que genera la PTAR Playa Norte y así aprovechar sus características nutrimentales. Se estima que la superficie cosechada con caña de azúcar requerirá 111 mil 983 toneladas de lodo seco para su fertilización. De esta manera, se fertilizaría por año cerca del 11% de la superficie.

Tabla 34. Información de saneamiento y de los Distritos de Riego en el Estado de Veracruz.

Saneamiento	
Plantas de tratamiento de agua residual municipal	118
Capacidad instalada (m ³ /s)	7.422
Caudal tratado (m ³ /s)	5.754
Producción estimada de lodos (t ST/año)	43,684.4
Plantas con capacidad superior a 1,000 L/s	1
PTAR Playa Norte	
• Capacidad instalada (m ³ /s)	1.6
• Caudal tratado (m ³ /s)	1.6
• Producción estimada de lodos (t ST/año)	12,147.2

Distritos de Riego	
Superficie total sembrada (ha)	54,302
Superficie total cosechada (ha)	52,828
Producción (Miles de toneladas)	3,080
DR035 La Antigua	
• Superficie sembrada (ha)	22,264
• Superficie cosechada (ha)	22,264
Cultivos principales	
• Caña de Azúcar (Riego Perenne)	
○ Superficie sembrada (ha)	18,965
○ Superficie sembrada (ha)	18,965

En la Figura 22 se muestra la ruta que seguiría el acarreo de los biosólidos de la PTAR Playa Norte hacia el Distrito de Riego La Antigua. La distancia que se recorrería es de cerca de 30 kilómetros.



Acotación	
■	DR035 La Antigua
●	PTAR Playa Norte
—	Ruta de acarreo

Figura 22. Mapa de las rutas de acarreo de las PTAR a los respectivos Distritos de Riego en el Estado de Veracruz.

En el Anexo II se muestra a detalle los resultados obtenidos del análisis para fertilizar las superficies de los Distritos de Riego por cada una de las plantas de tratamiento de aguas residuales seleccionadas, así como los mapas del acarreo de biosólidos para cada caso estudiado.

6.6 Análisis de costos de acarreo

En la Tabla 35 se muestran los costos estimados para cada caso estudiado del acarreo de los biosólidos.

Tabla 35. Análisis económico del acarreo de biosólidos.

Plantas	Lodo seco (t/año)	Lodo húmedo (m ³ /año)	Distancia (km)	Costo de acarreo de acuerdo a la distancia (\$)	Número de viajes anuales para acarreo de biosólidos	Costo anual de acarreo de biosólidos (MDP)
PTAR Ciudad de Aguascalientes	7,243	24,143	49	381	3,449	2.910
PTAR Binacional	8,169	27,230	212	1,610	3,890	8.063
PTAR Cerro de la Estrella	16,626	55,422	44	343	7,917	6.382
PTAR Playa Norte	12,147	40,491	30	238	5,784	4.052
PTAR Colima-Villa de Álvarez	6,453	21,511	1	19	3,073	1.480
PTAR Chihuahua Sur	12,299	40,996	68	524	5,857	5.781
PTAR Sur de Cd. Juárez	12,299	40,996	1	19	5,857	2.822
PTAR Norte de Cd. Juárez	10,249	34,164	1	19	4,880	2.352
PTAR Chihuahua Norte	3,264	10,882	80	615	1,554	1.675
PTAR Agua Prieta	45,780	152,599	73	562	21,800	22.340
PTAR El Ahogado	15,943	53,144	1	19	7,592	3.659
PTAR SEAPAL Norte II	6,757	22,523	111	849	3,217	4.219
PTAR Tierra Negra	9,110	30,368	123	939	4,338	6.081
PTAR Nuevo Laredo	6,795	22,649	1	19	3,236	1.559

Plantas	Lodo seco (t/año)	Lodo húmedo (m³/año)	Distancia (km)	Costo de acarreo de acuerdo a la distancia (\$)	Número de viajes anuales para acarreo de biosólidos	Costo anual de acarreo de biosólidos (MDP)
PTAR Reynosa I	6,453	21,511	21	170	3,073	1.944
PTAR Toluca Norte	9,110	30,368	75	577	4,338	4.511
PTAR Toluca Oriente	6,764	22,548	82	630	3,221	3.519
PTAR Lago de Texcoco I	6,074	20,245	26	208	2,892	1.939
PTAR Atotonilco de Tula	68,328	227,760	19	155	32,537	20.095
PTAR León	11,578	38,593	100	766	5,513	6.772
PTAR Puebla	9,809	32,696	55.4	437	4,671	4.202
PTAR Tanque Tenorio	7,592	25,307	127	969	3,615	5.176
PTAR Morelia	8,351	27,837	2	27	3,977	1.946
PTAR Principal	6,833	22,776	241	1,829	3,254	7.455
PTAR Aguas Blancas	10,249	34,164	81	622	4,881	5.295
PTAR Culiacán Norte	11,638	38,795	1	19	5,542	2.670
PTAR Dulces Nombres	47,602	158,673	247	1,874	22,667	52.968
PTAR Norte	18,175	60,584	212	1,610	8,655	17.940
PTAR Noreste	9,422	31,406	138	1,052	4,486	6.796

Como se mencionó anteriormente, la distancia de acarreo y el volumen de lodos acarreados son los dos factores que influyen en el impacto económico de este estudio.

Para tener una estimación de costos en casos donde la PTAR se localiza justo dentro de la superficie del Distrito de Riego al que se destinó el biosólido, se consideró solamente el costo por el primer kilómetro de acarreo de biosólido, debido a la cercanía que tienen con los cultivos.

Durante el estudio resultaron casos en los que el Distrito de Riego que se seleccionó como destino de los biosólidos de la PTAR se encontraba a una distancia alejada, lo que elevaba los costos considerablemente. Por citar un par de casos, las PTAR Dulces Nombres y Norte de Nuevo León tienen costos anuales de acarreo muy elevados, esto debido a que se encuentran muy distantes de los respectivos Distritos de Riego a las que fueron relacionadas. Se planteó enviar los biosólidos de ambas plantas a Distritos de Riego localizados en el estado de Tamaulipas, debido a que en la entidad donde se localizan no quedan Distritos de Riego disponibles para su fertilización. En escenarios como los mencionados los costos de acarreo resultaron altos.

La propuesta de reúso de los biosólidos de la PTAR Dulces Nombres en el Distrito de Riego 026 Bajo Río San Juan presenta el mayor costo anual de acarreo en este estudio, siendo superior a los 52 millones de pesos debido al acarreo de más de 158 mil toneladas de lodos por 247 kilómetros. Sin embargo, tal cifra resulta coherente e incluso relativamente más baja en contraste con el dato del costo de traslado de basura de la Ciudad de México hacia Morelos. De acuerdo con, la Ciudad de México eroga 1.9 millones de pesos diarios para transportar 5 mil toneladas de basura, de modo que por transportar 158 mil toneladas de basura a una distancia aproximada 130 kilómetros (que es la distancia estimada de la Ciudad de México a Morelos), el gasto sería mayor a los 60 millones de pesos.

7 Resumen de resultados

En la Tabla 36 se presenta un resumen con los resultados más relevantes del estudio hecho sobre el reúso de los lodos producidos por cada PTAR en los cultivos de los Distritos de Riego seleccionados para su análisis.

Tabla 36. Resultados finales del estudio

PTAR	Distrito de Riego	Producción de lodo (t LH/año)	Superficie fertilizada de cultivos principales	Distancia de acarreo (Km)	Costo de acarreo (MDP)
Atotonilco de Tula	DR003 Tula	227,760	35% (Maíz grano)	19	20.095
Agua Prieta	DR013 Edo. De Jalisco	155,932	31% (Maíz grano)	46	17.902
Dulces Nombres	DR026 Bajo Río San Juan	158,673	23% (Sorgo grano)	247	52.968
Norte de NL	DR004 Don Martín	60,584	100% (Trigo grano)	212	17.94
			45% (Sorgo grano)		
Cerro de la Estrella	DR088 Chiconautla	55,422	29% (Maíz forrajero verde)	44	6.382
Chihuahua Sur	DR005 Delicias	40,996	72% (Nogal)	68	5.781
León	DR011 Alto Río Lerma	38,593	5% (Cebada)	100	6.772
El Ahogado	DR013 Edo. De Jalisco	53,144	11% (Maíz grano)	1	3.659
Sur de Cd. Juárez	DR009 Valle de Juárez	40,996	16% (Algodón)	1	2.822
Cd. Aguascalientes	DR001 Pabellón	24,143	23% (Maíz grano)	49	2.91
Noreste de NL	DR031 Las Lajas	31,406	100% (Sorgo grano)	138	6.796
			100% (Sorgo forrajero verde)		
			100% (Maíz grano)		
			100% (Soya industrial)		
			80% (Zacate verde)		
Tierra Negra	DR092A Río Pánuco-U, Las Ánimas	30,368	26% (Sorgo grano)	123	6.081
Culiacán Norte	DR010 Culiacán-Humaya	39,796	5% (Sorgo grano)	1	2.67
Playa Norte	DR035 La Antigua	40,491	11% (Caña de azúcar)	30	4.052

PTAR	Distrito de Riego	Producción de lodo (t LH/año)	Superficie fertilizada de cultivos principales	Distancia de acarreo (Km)	Costo de acarreo (MDP)
Norte de Cd. Juárez	DR009 Valle de Juárez	34,164	13% (Algodón)	1	2.352
Nuevo Laredo	DR050 Acuña-Falcón	22,649	66% (Sorgo forrajero verde)	1	1.559
Aguas Blancas	DR105 Nexpa	34,164	100% (Maíz grano Otoño-Invierno)	81	5.295
			100% (Maíz grano Primavera-Verano)		
			78% (Zacate)		
Toluca Norte	DR033 Edo. Méx.	30,368	48% (Maíz grano)	75	4.511
Morelia	DR020 Morelia	27,837	18% (Maíz grano)	2	1.946
Principal	DR017 Región Lagunera	22,776	52% (Nogal)	241	7.455
Colima - Villa de Álvarez	DR053 Edo. Colima	21,511	5% (Plátano)	1	1.48
Norte de Chihuahua	DR005 Delicias	10,882	19% (Nogal)	80	1.675
SEAPAL Norte II	DR093 Tomatlán	22,523	100% (Arroz grano Otoño-Invierno)	111	4.219
			45% (Arroz grano Primavera-Verano)		
Puebla San Francisco	DR030 Valsequillo	32,696	7% (Maíz grano)	56	4.202
Binacional	DR014 Río Colorado	27,230	37% (Sorgo grano)	212	8.063
Tanque Tenorio	DR049 Río Verde	26,307	78% (Maíz elotero)	127	5.176
Toluca Oriente	DR033 Edo. Méx.	22,548	35% (Maíz grano)	82	3.519
Lago de Texcoco I	DR088 Chiconautla	20,245	11% (Maíz forrajero verde)	26	1.939
Reynosa I	DR025 Bajo Río Bravo	21,511	9% (Sorgo grano)	21	1.944

8 Conclusiones

En este estudio se analizó la opción de reutilizar los biosólidos de cada PTAR como fertilizantes en Distritos de Riego. Del adecuado tratamiento de lodos de cada PTAR estudiada, se espera obtener por lo menos un biosólido de tipo C el cual es apto para usos agrícolas. A su vez, se logró determinar una tasa anual de aplicación de los biosólidos para fertilizar los cultivos seleccionados de cada Distrito de Riego estudiado.

El contenido de nutrientes en los biosólidos (específicamente nitrógeno) ha sido determinante para considerar factible su reúso como fertilizantes. En el estudio se obtuvieron resultados positivos para la fertilización de las distintas especies vegetales analizadas, consiguiendo fertilizar anualmente porciones considerables de las superficies correspondientes a los Distritos de Riego seleccionados.

Por otro lado, el análisis de costos del acarreo de los biosólidos arroja resultados favorables en cada una de las propuestas que se hicieron. De igual forma debe considerarse el impacto económico que tendría el aprovechamiento agrícola de los biosólidos al reducir el uso de fertilizantes químicos.

La factibilidad de poner en marcha estas alternativas para reutilizar los biosólidos en los Distritos de Riego se verá reflejada no solo en los costos relativamente accesibles sino también en el aprovechamiento de los biosólidos que, por sus características, beneficiaría la agricultura en México.

9 Análisis de resultados

Del estudio se logró conocer qué tipo de tratamientos dan algunas PTAR a los lodos que producen, por ejemplo, en casos como la PTAR Atotonilco de Tula o las PTAR Norte y Sur de Ciudad Juárez, se sabe que estabilizan sus lodos a partir de procesos de digestión, De modo que se esperaría obtener un biosólido de Clase B, el cual resulta apto para usos agrícolas. Así se concluye que, dadas sus características, y suponiendo que no exceden los límites de metales de la

normatividad mexicana, es posible reutilizar los biosólidos generados en las 29 PTAR estudiadas como fertilizantes en Distritos de Riego.

Por otro lado, los costos que impactarían en las operaciones de acarreo de los biosólidos, en resumidas cuentas, resultaron aceptables. Se debe tener en cuenta que los costos de acarreo dependen mucho de las distancias y del volumen de material que se transporte. De modo que en casos donde la generación de lodos y las distancias de transporte sean altas se esperaría que los costos de acarreo sean también altos. Tal panorama es visible en el escenario de reúso de los biosólidos de la PTAR Dulces Nombres en el Distrito de Riego 026 Bajo Río San Juan. En dicho caso, la distancia que implica el acarreo del material es de 247 kilómetros y además, siendo la tercer PTAR más grande del país, genera una gran cantidad de lodos, lo cual son factores que arrojan un gasto anual total de acarreo de más de 52 millones de pesos.

10 Recomendaciones

La lejanía que puede existir entre una PTAR y el Distrito de Riego más próximo es una situación desfavorable para el transporte de biosólidos, de modo que se podría analizar la propuesta de aprovechar los biosólidos para ampliar la superficie o para dar apertura a Distritos de Riego más cercanos, lo que sería posible dado que las características de los biosólidos favorecen además a restaurar la tierra y prepararla para la agricultura. Para el estado de Nuevo León, que cuenta con 3 PTAR muy importantes, esta alternativa podría ponerse en marcha ya que la entidad tiene únicamente dos Distritos de Riego; el DR004 Don Martín y el DR031 Las Lajas. Este último Distrito de Riego se localiza en un punto estratégico de la entidad, cercano a las PTAR Norte, Noreste y Dulces Nombres, las cuales podrían reusar sus biosólidos para extender la superficie del distrito y en un futuro fertilizar sus cultivos.

Para todos los escenarios analizados en este estudio, se propone que, para abaratar los costos de acarreo, se reduzca el volumen de los biosólidos. Esto puede ser posible aumentando la sequedad de los mismos. Por citar un ejemplo,

la PTAR Atotonilco de Tula envía sus lodos después de su estabilización a monorellenos en los cuales alcanzan una sequedad aproximada del 90%, reduciendo de manera considerable su volumen y por consecuencia los costos anuales por acarreo se reducen a causa de una menor recurrencia en transportar los biosólidos.

11 REFERENCIAS

- Comisión Nacional del Agua CONAGUA, 2016. Estadísticas del Agua en México Edición 2016. SEMARNAT: 124 pp.
- International Plant Nutrition Institute IPNI, 2002. Requerimientos Nutricionales de los Cultivos, Archivo Agronómico No. 3. INPOFOS.
- COMPO EXPERT, 2015. Programa de Fertilización en Nogales. Edición de Marzo 2015.
- López, L., 2013. Abonado de los Cereales Trigo y Cebada. Universidad de Córdoba.
- Sela, G. 2014, Fertilización en Banano. SMART! Fertilizer Management.
- Sáenz, E., Saucedo, R., Morales, C., Jurado, P., Lara, C., Melgoza, A., Ortega, J., 2015. Producción y calidad de semilla de pastos forrajeros como respuesta a la fertilización en Aldama Chihuahua. México; 115, 116 pp.
- AgroEs. El Nitrógeno en fertilización de los cultivos forrajeros y recomendaciones de abonado nitrogenado. Recuperado de: <http://www.agroes.es>
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA, 2015. Estadísticas de Distritos de Riego Año Agrícola 2013-2014. SEMARNAT.
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA, 2016. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2015. SEMARNAT.
- Pedroza, E., Hinojosa, G. 2013, Manejo y Distribución del Agua en Distritos de Riego: Breve Introducción Didáctica. Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua, México: 9,10 pp.

- Campos, E., García, N., Velásquez, A., García, M. 2009. Análisis básico del reuso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en los suelos de pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca. *Rev. Quiversa (11)2*. México: 35-51 pp.
- Castrejón, A. M., Barrios, J. A., Jiménez, B., Maya, C., Rodríguez, A. y González, A. 2002. Evaluación de la calidad de lodos residuales de México, XIII Congreso Nacional FEMISCA 2002, “Una Gestión Ambiental por el Bien del Planeta” Tomo I, 219-225 pp.
- Delgado, M., Miralles, R., Porcel, M. A., Beltrán, E. M., Beringola, L., Martín J. V., Bigeriego, M. Ensayo sobre el efecto como fertilizantes del compost de lodo y del RSU para su empleo en la forestación de tierra agraria. *Montes 67*: 54-58 pp.
- Vesilind, P. A. 1980. Treatment and disposal of wastewater sludges. Ann Arbor Science Publishers. Ann Arbor, USA.
- Ortíz-Hernández, M.L., Gutiérrez-Ruíz, M.E. y Sánchez-Salinas, E. 1995. Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la ciudad industrial del valle de Cuernavaca, Estad de Morelos, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 11(2): 105-115 pp.
- Utria, E., Cabrera, J. A., Reynaldo, I. M., Morales, D., Fernández, A. M., Toledo, E. 2008. Utilización agraria de los biosólidos y su influencia en el crecimiento de plántulas de tomate (*lycopersicon esculentum mill*). *Rev. Chapingo Serie Horticultura 14(1)*. México.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. 18 de Febrero del 2002.
- Bautista, F. 1999. Introducción al Estudio de la Contaminación del Suelo por Metales Pesados. Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA. 2007. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

- LeBlanc, R. J., Matthews, P. y Richard, R. P. 2008. Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. Edit. UN-HABITAT. Kenia. 632 pp.
- Girovich, M. 1996. Biosolids treatment and management. Marcel Dekker, Inc., Estados Unidos: 392-395 pp.
- Rigby, H., Clarke, B., Pritchard, D., Meehan, B., Beshah, F., Smith, S., Porter, N. 2015, A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. Science of the Total Environment 541.
- National Research Council (1996). Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Production, National Academic Press, Washington, DC, USA.
- Andrews, N. and J. Foster. 2007. User guide: Organic fertilizer calculator. EM 8936-E. Oregon State University. Corvallis, OR.
- Díaz-Avelar, J., Barrios, J. A., Jiménez, B. 2004, Effect of the application of acid treated biosolids on marigold (*Tagetes erecta*) development. Water Science and Technology (50)9: 33-40 pp.
- Oregon State University. Fertilizing with biosolids, 2007. PNW 508-E. 4 pp.
- Andreu, J., Betrán J., Delgado I., Espada J. L., Gil M., Gutiérrez M., Iguácel F., Isla R., Muñoz F., Orús F., Pérez M., Quílez D., Sin E., Yagüe M. R. 2006, Fertilización Nitrogenada. Guía de Actualización. Gobierno de Aragón. Departamento de Agricultura y Alimentación: 130 pp.
- Banco de Desarrollo de América del Norte, BDAN. 2015, Proyecto de Cogeneración y Mejoramiento en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Sur Ciudad Juárez Chihuahua. BD 2015-12.
- Tobón, G, Samaniego, L., Herrera, R., Díaz, L., Carlos, S., Aguilera, S., Valdés, A. 2010, Información de la Planta Tratadora de Aguas Residuales (PTAR) Principal de Saltillo. Anexo A,
- Comisión Nacional del Agua. CONAGUA. 2011, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco. SEMARNAT.

- Comisión Estatal del Agua Jalisco. CEA. 2012, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Agua Prieta.
- Comisión Estatal del Agua San Luis Potosí. CEA. 2003, Plan Integral de Saneamiento. Reúso de las aguas residuales tratadas, de la ciudad de San Luis Potosí y su Zona conurbada de Soledad de Graciano Sánchez.
- Palomares, M, A., (2012). PTAR Tierra Negra. Recuperado de: <https://aguayambiente.com/2015/04/17/planta-tratamiento-tierra-negra/>
- Servicio de Agua y Drenaje de Monterrey I.P.D. (SADM), (2011). Procesos de Saneamiento-Tratamiento-Normatividad. Recuperado de: <https://www.sadm.gob.mx/PortalSadm/jsp/seccion.jsp?id=299>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). CTR. Construcción. N-CTR-CAR-1-01-013/00.
- Varela, L. 2013, Costos de Construcción Pesada Volumen III-1301. Varela Ingeniería de Costos, México. 69 pp.
- Carbonell, G., Pro, J., Gómez, N., Babín, M.M., Fernández, C., Alonso, E. y Tarazona, J.V. 2009. Sewage sludge applied to agricultural soil: Ecotoxicological effects on representative soil organisms. Rev. Ecotoxicology and Environmental Safety. España. 72: 1309-1319 pp.
- Robledo, E. S. 2012. Manejo y uso de biosólidos en suelos agrícolas. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Estado de México.
- Oberle, S. L. 1994. Interactions of sewage sludge with soil-crop-water systems. En: Publication, SSSA Miscellaneous. (Eds.) Clapp, C. E. et al. 1994. Sewage sludge: land utilization and the environment. 17-20 pp.
- Epstein, E. 2003. Land application of sewage sludge and biosolids. Edit. CRC. E.U.A. 201 pp.
- Metcalf and Eddy, 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Diposal and Reuse. 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.

12 Anexo I. Definiciones

La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 establece las siguientes definiciones:

- Lodos residuales

Sólidos con un contenido variable de humedad que provienen del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, los cuales no han sido sometidos a procesos de estabilización.

- Biosólidos

Lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento.

- Aprovechamiento

Esto es el uso de los biosólidos como mejoradores o acondicionadores de suelos por su contenido de materia orgánica y nutrientes, o en cualquier actividad que represente un beneficio.

- Estabilización

Procesos físicos, químicos o biológicos a los que son sometidos los lodos para acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final para evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente.

- Disposición final

La acción de depositar de manera permanente lodos y biosólidos en sitios autorizados.

- Sólidos totales (ST)

Son los materiales residuales que permanecen en los lodos y biosólidos y que han sido deshidratados entre 103°C a 105°C hasta alcanzar un peso constante y son equivalentes en base a peso seco.

- Sólidos volátiles (SV)

Son los sólidos orgánicos totales contenidos en los lodos y biosólidos, que se volatilizan cuando éstos se queman a 550°C en presencia de aire por un tiempo determinado.

- Patógeno

Microorganismo capaz de provocar enfermedades si está presente en cantidades suficientes y condiciones favorables.

- Mejora de suelos

Es la aplicación de los biosólidos en terrenos para mejorar sus características físicas, químicas o microbiológicas.

- Terrenos con fines agrícolas

Son las superficies sobre las cuales se pueden cultivar productos agrícolas para consumo humano y animal, incluyendo los pastizales.

El Compendio de Estadísticas Ambientales 2010 en el rubro de Agricultura y Ganadería establece las siguientes definiciones:

- Año Agrícola

Es un periodo continuo de 12 meses de duración tomado para fines de programación agrícola e hidrométrica en México. Este periodo inicia el 1 de octubre de un año y culmina el 30 de septiembre del siguiente año.

- Ciclo Agrícola

Es la división del año agrícola en periodos de tiempo las cuales presentan características climáticas que favorecen el desarrollo de distintos cultivos. En un año agrícola se identifican cuatro ciclos agrícolas: Otoño-Invierno, Primavera-Verano, Perennes y Segundos Cultivos.

- Cultivos Cíclicos

También denominados como anuales o de ciclo corto. Se siembran y se cultivan en los dos ciclos del año agrícola; Otoño-Invierno y Primavera-Verano. La duración de su periodo vegetativo es menor a los doce meses y requieren de una nueva siembra para la obtención de cosecha.

- Cultivos de Otoño-Invierno

Son aquellos que se siembran entre el 1 de Octubre de un año y el 31 de enero del siguiente.

- Cultivos de Primavera-Verano

Se consideran aquellos que se siembran entre el 1 de Febrero y el 30 de septiembre.

- Cultivos Perennes

Denominados también como cultivos de ciclo largo, son aquellos cuyo periodo vegetativo se extiende más allá de los doce meses y por lo regular una vez establecida la plantación se obtienen varias cosechas, mismas que son continuas o cíclicas, dependiendo del tipo de plantación.

- Acarreo

Transporte de material generado de bancos, excavaciones, cortes, desmontes, despalmes o derrumbes, desde el lugar de su extracción hasta el sitio de su utilización, depósito o banco de desperdicio.

13 Anexo II. Fichas con los resultados del análisis de cada Planta de Tratamiento de Agua Residual

13.1 PTAR Atotonilco de Tula, Tula Hidalgo.

Tabla 37. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Atotonilco de Tula

PTAR	
Proceso	Dual (Lodos Activados-Primario Avanzado)
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	23,000
Q_{tratado} (L/s)	9,000
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	68,328
Distrito de Riego	
Nombre	DR003 Tula, Hidalgo.
Superficie total (Ha)	548,812
Cultivo principal	Maíz de grano
Superficie del cultivo principal (Ha)	16,172
Requerimiento de N (kg/ton)	22
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	11.9
Requerimiento de N (kg/Ha)	261.8
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	12.1
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	195,530
Porcentaje de la superficie fertilizada	35%
Distancia (km)	19

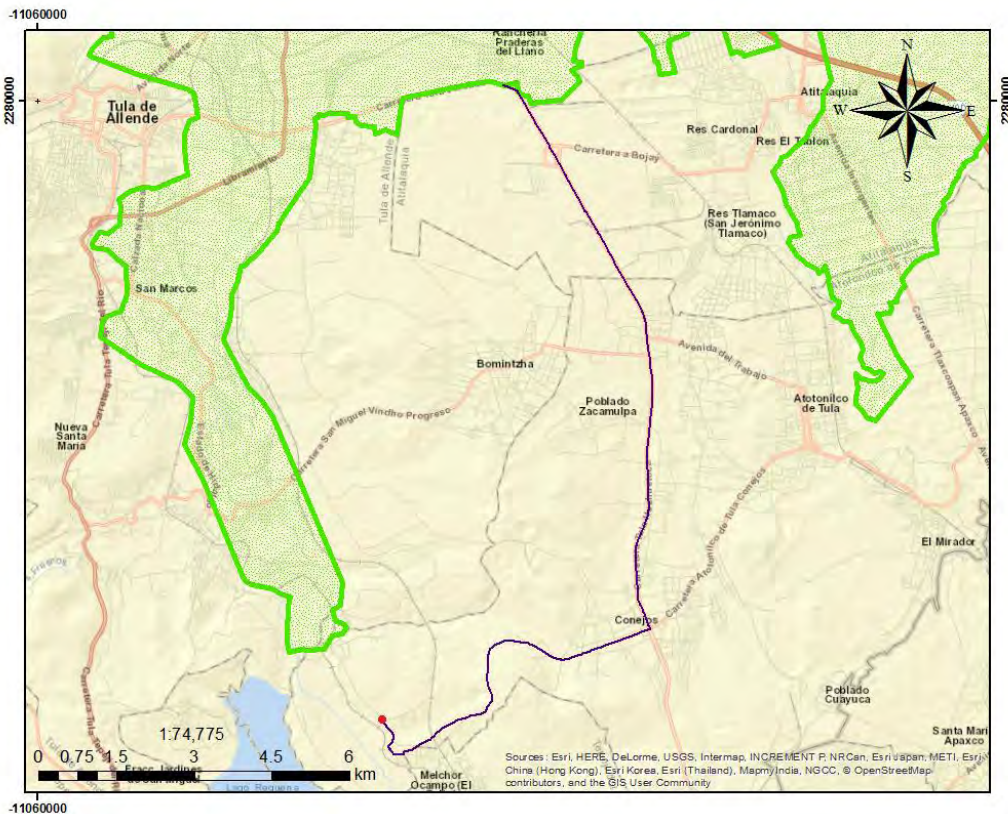


Figura 23. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Atotonilco de Tula al DR003

13.2 PTAR Agua Prieta, Zapopan, Jalisco

Tabla 38. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Agua Prieta

PTAR	
Proceso	Lodos Activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	8,500
Q_{tratado} (L/s)	6,030
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	45,780
Distrito de Riego	
Nombre	DR013 Edo. Jalisco, Jalisco.
Superficie total (Ha)	46,252
Cultivo principal	Maíz de grano
Superficie del cultivo principal (Ha)	25,565
Requerimiento de N (kg/ton)	22
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	5.7
Requerimiento de N (kg/Ha)	125.8
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	5.8
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	148,575
Porcentaje de la superficie fertilizada	31%
Distancia (km)	46

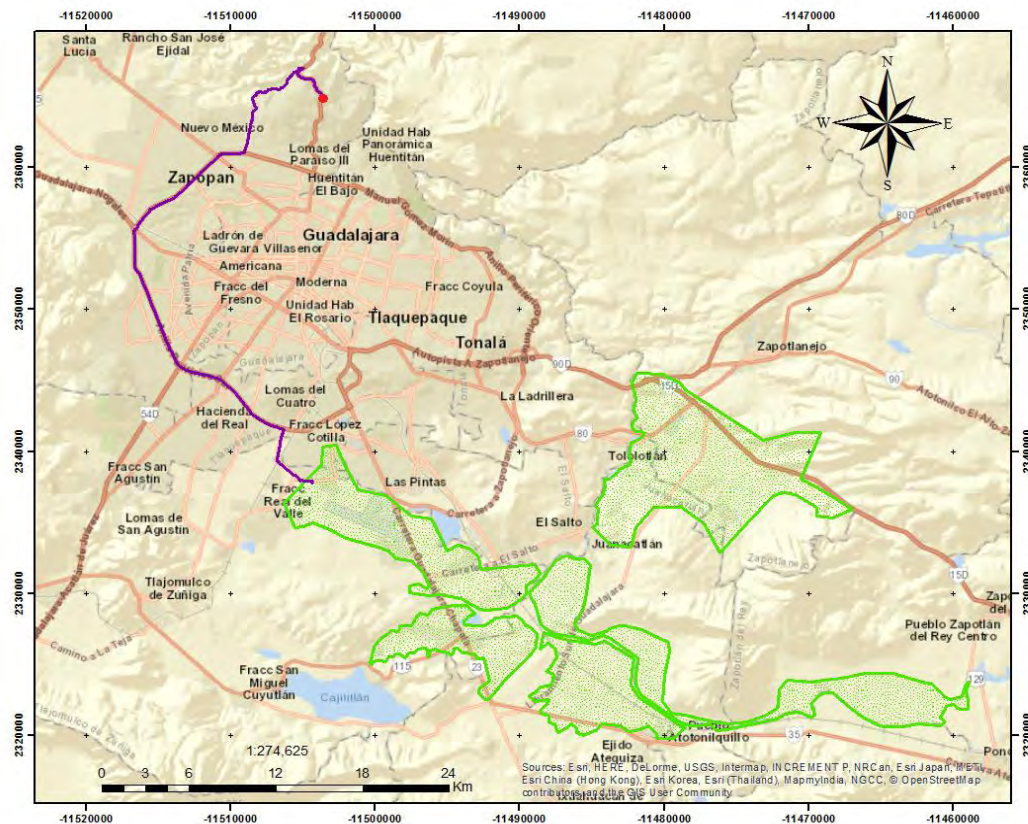


Figura 24. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Agua Prieta al DR013

13.3 PTAR Dulces Nombres, Pesquería, Nuevo León

Tabla 39. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Dulces Nombres

PTAR	
Proceso	Lodos Activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	7,800
Q_{tratado} (L/s)	6,270
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	47,602

Distrito de Riego	
Nombre	DR026 Bajo Río San Juan, Tamaulipas.
Superficie total (Ha)	72,452
Cultivo principal	Sorgo de grano
Superficie del cultivo principal (Ha)	29,500
Requerimiento de N (kg/ton)	30
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	5.1
Requerimiento de N (kg/Ha)	151.8

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	7
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	206,812
Porcentaje de la superficie fertilizada	23%
Distancia (km)	247

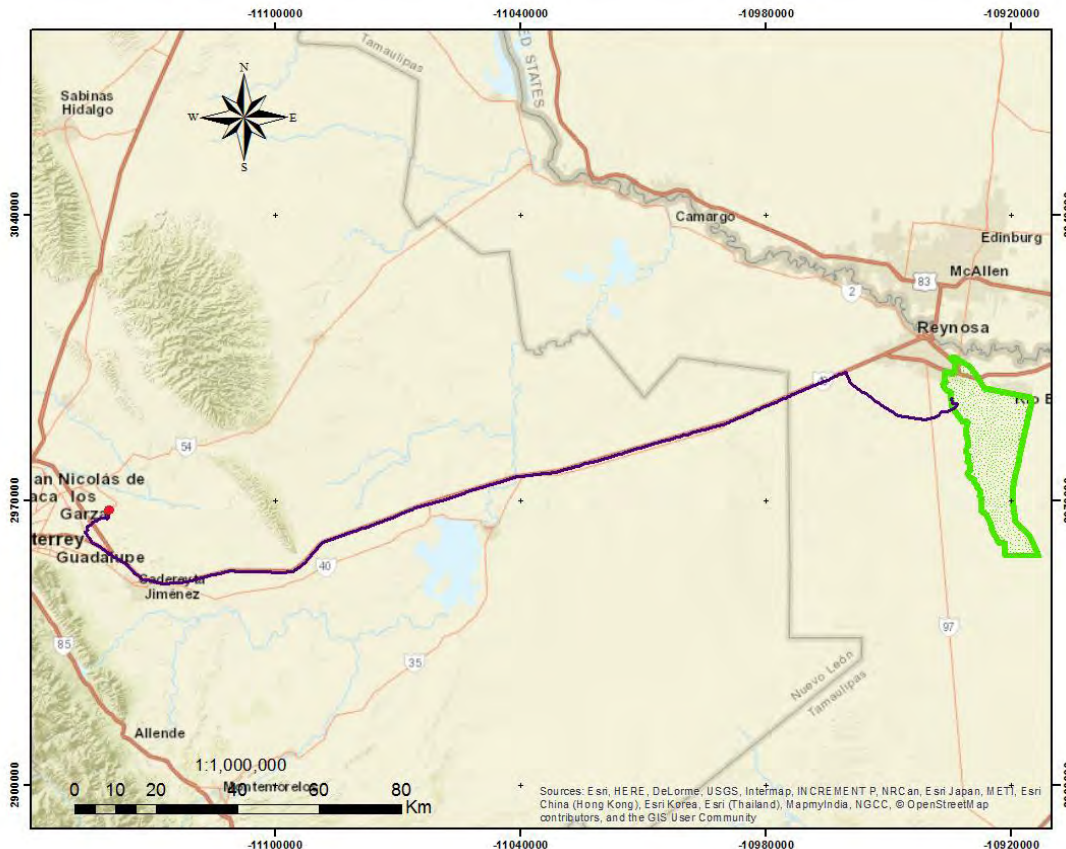


Figura 25. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Dulces Nombres al DR026

13.4 PTAR Norte, General Escobedo, Nuevo León

Tabla 40. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Norte

PTAR	
Proceso	Lodos Activados
Q _{instalado} (L/s)	3,000
Q _{tratado} (L/s)	2,394
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	18,175
Distrito de Riego	
Nombre	DR004 Don Martín, Coah.-NL.
Superficie total (Ha)	9,049
Cultivos principales	Trigo de grano Sorgo de grano
Trigo de grano	
Superficie del cultivo principal (Ha)	2,696
Requerimiento de N (kg/ton)	30
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	3.5
Requerimiento de N (kg/Ha)	105
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	4.8
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	13,074
Porcentaje de la superficie fertilizada	100%
Sorgo de grano	
Superficie del cultivo principal (Ha)	2,617
Requerimiento de N (kg/ton)	30
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	3.1
Requerimiento de N (kg/Ha)	92.7
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	4.3
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	11,204
Porcentaje de la superficie fertilizada	45%
Distancia (km)	212

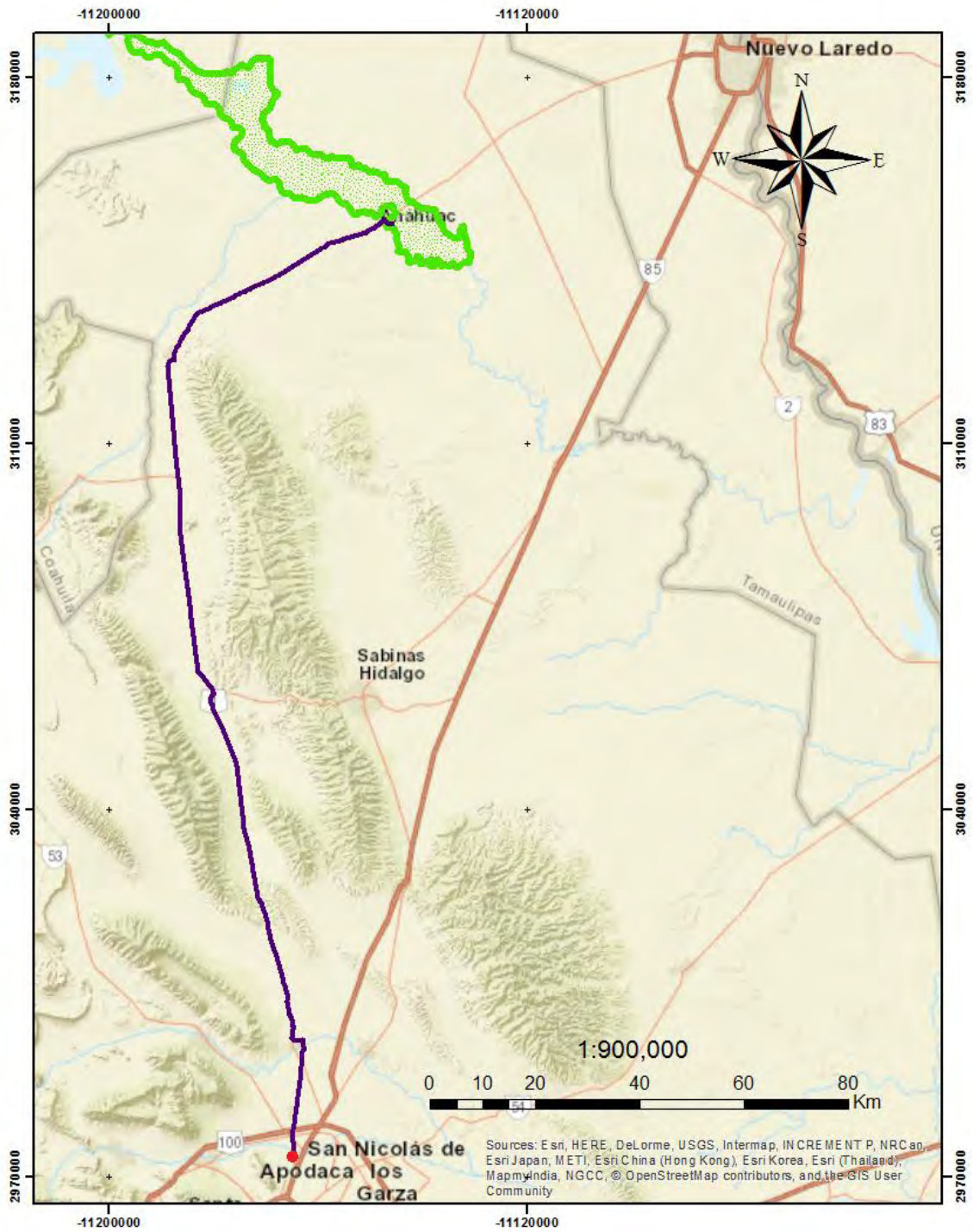


Figura 26. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Norte al DR004

13.5 PTAR Cerro de la Estrella, Iztapalapa, CDMX

Tabla 41. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Cerro de la Estrella

PTAR	
Proceso	Lodos Activados
Q _{instalado} (L/s)	3,000
Q _{tratado} (L/s)	2,190
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	16,626
Distrito de Riego	
Nombre	DR088 Chiconautla, Edo. Méx.
Superficie total (Ha)	1,728
Cultivo principal	Maíz forraje verde
Superficie del cultivo principal (Ha)	1,202
Requerimiento de N (kg/ton)	12.7
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	80
Requerimiento de N (kg/Ha)	1,014
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	46.8
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	56,267
Porcentaje de la superficie fertilizada	29%
Distancia (km)	44

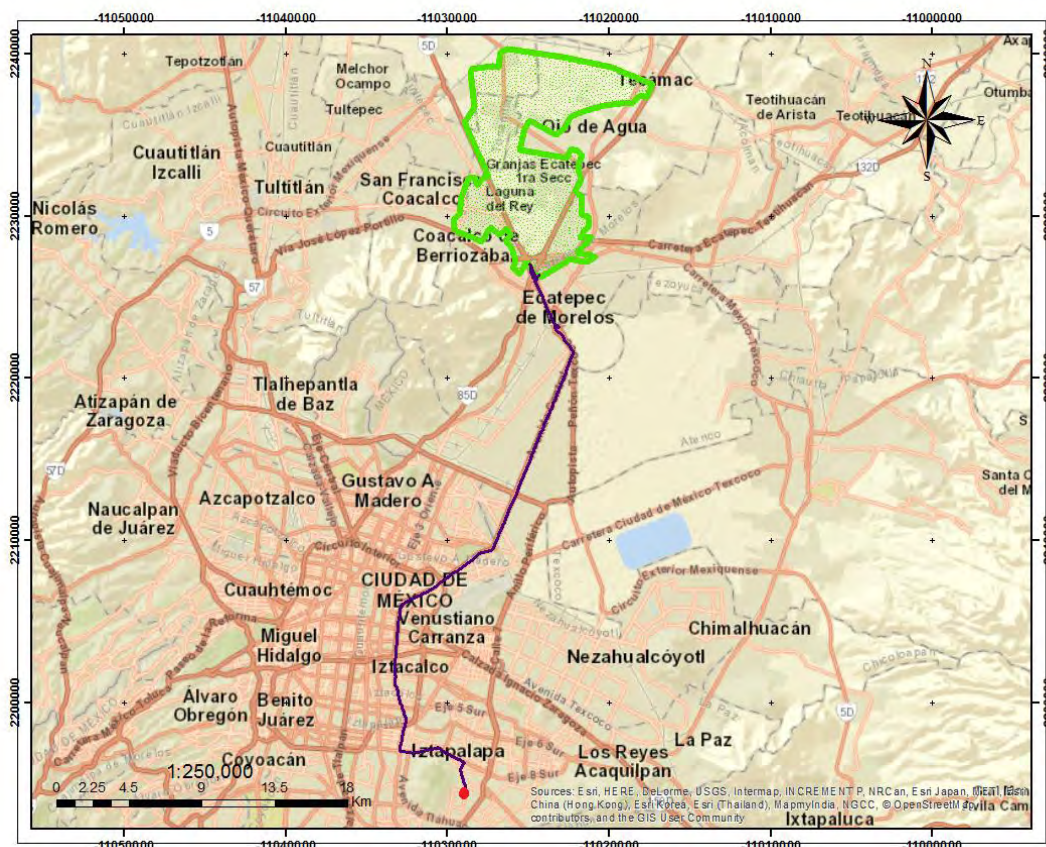


Figura 27. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Cerro de la Estrella al DR088

13.6 PTAR Sur, Chihuahua, Chihuahua

Tabla 42. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Sur

PTAR	
Proceso	Lodos Activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	2,500
Q_{tratado} (L/s)	1,620
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	12,299

Distrito de Riego	
Nombre	DR005 Delicias, Chihuahua
Superficie total (Ha)	54,096
Cultivos principales	Nogal (nuez)
Superficie del cultivo principal (Ha)	8,302
Requerimiento de N (kg/ton)	30
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	1.5
Requerimiento de N (kg/Ha)	44.4

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	2
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	17,023
Porcentaje de la superficie fertilizada	72%
Distancia (km)	68

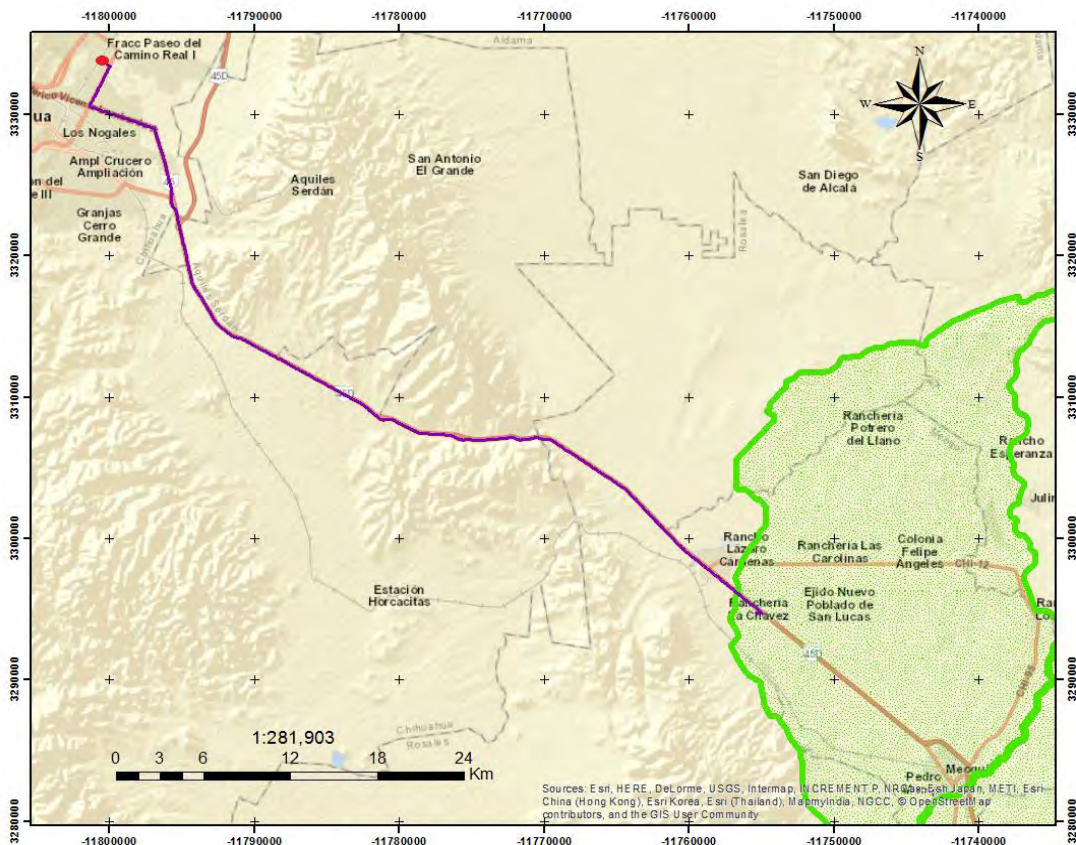


Figura 28. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Sur al DR005

13.7 PTAR León, León, Guanajuato

Tabla 43. Ficha de resultados del análisis de la PTAR León

PTAR	
Proceso	Lodos Primarios
Q _{instalado} (L/s)	2,500
Q _{tratado} (L/s)	1,525
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	11,578

Distrito de Riego	
Nombre	DR011 Alto Río Lerma, Guanajuato
Superficie total (Ha)	154,451
Cultivos principales	Cebada
Superficie del cultivo principal (Ha)	36,523
Requerimiento de N (kg/ton)	25
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	5.5
Requerimiento de N (kg/Ha)	136.5

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	20.1
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	6.8
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	247,655
Porcentaje de la superficie fertilizada	5%
Distancia (km)	100

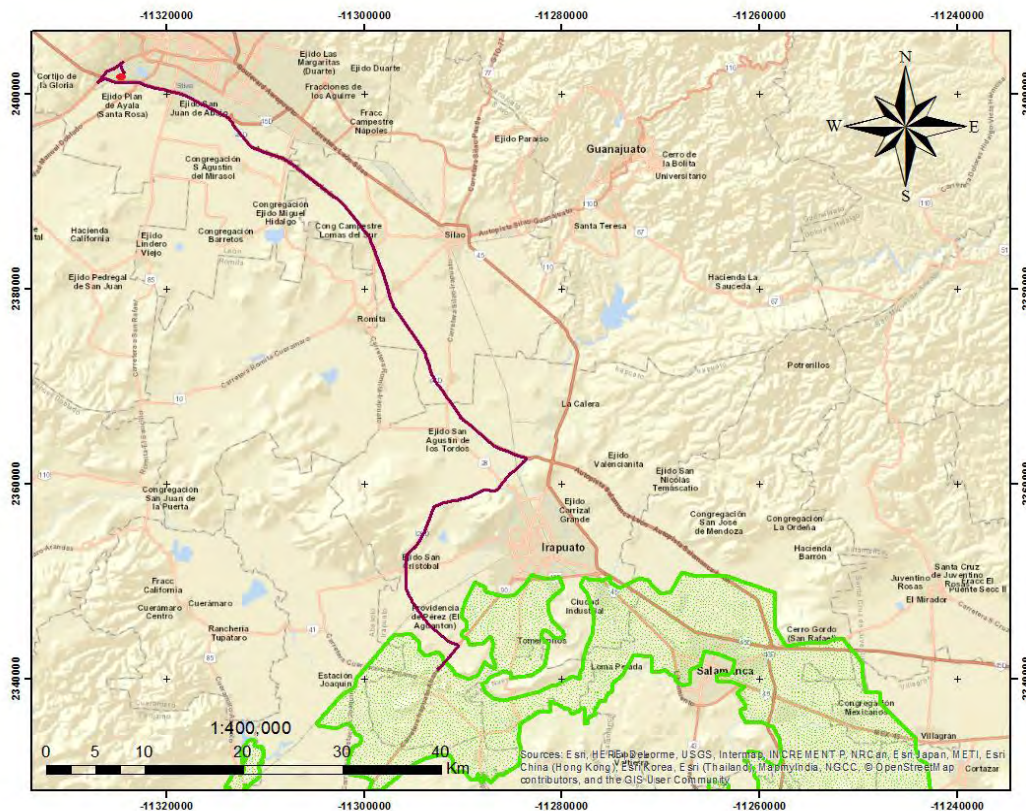


Figura 29. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR León al DR011

13.9 PTAR Sur, Ciudad Juárez, Chihuahua

Tabla 45. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Sur

PTAR	
Proceso	Lodos Activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	2,000
Q_{tratado} (L/s)	1,620
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	12,297

Distrito de Riego	
Nombre	DR009 Valle de Juárez, Chihuahua
Superficie total (Ha)	9,780
Cultivos principales	Algodón
Superficie del cultivo principal (Ha)	4,709
Requerimiento de N (kg/ton)	120
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	2.9
Requerimiento de N (kg/Ha)	348

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	16.1
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	75,681
Porcentaje de la superficie fertilizada	16%
Distancia (km)	1

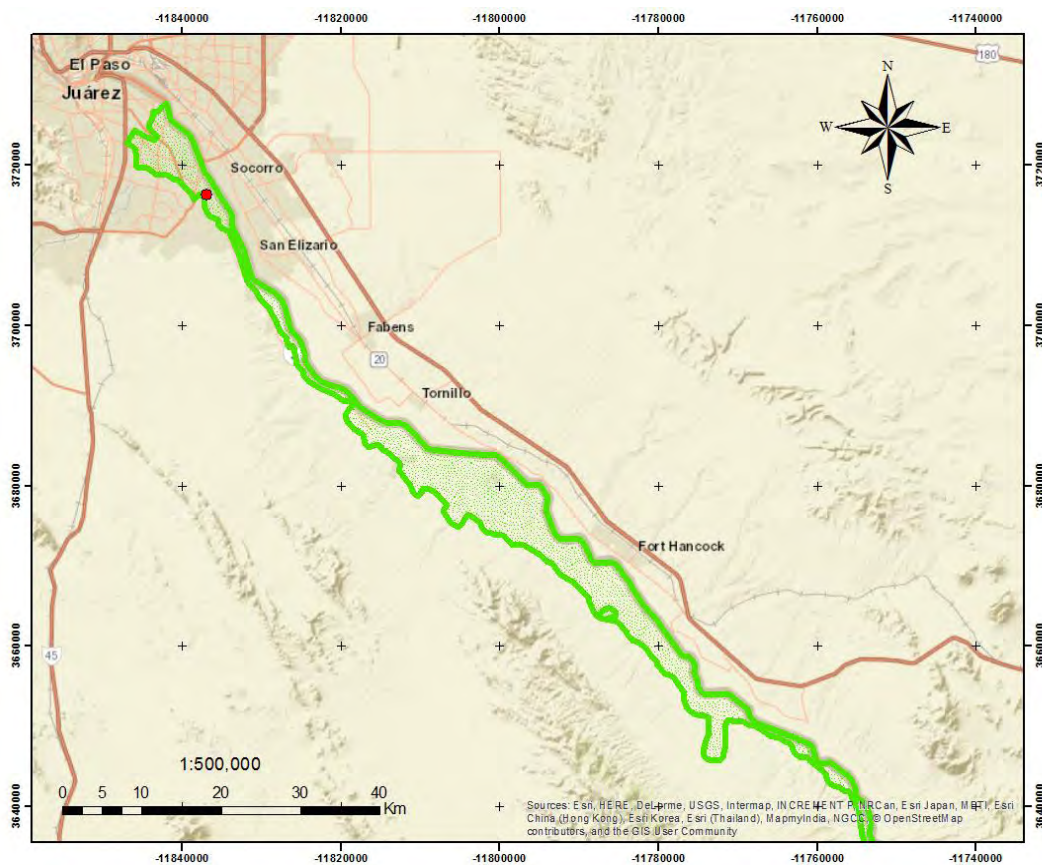


Figura 31. Mapa de acarreos de biosólidos de la PTAR Sur al DR009

13.11 PTAR Noreste, Apodaca, Nuevo León

Tabla 47. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Noreste

PTAR	
Proceso	Lodos Activados
Q _{instalado} (L/s)	1,875
Q _{tratado} (L/s)	1,241.5
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	9,422

Distrito de Riego	
Nombre	DR031 Las Lajas, NL
Superficie total (Ha)	1,948
Cultivos principales	Sorgo grano Sorgo forrajero verde Maíz grano Zacate Soja industrial

Sorgo grano	
Superficie del cultivo principal (Ha)	1,189
Requerimiento de N (kg/ton)	30
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	3.6
Requerimiento de N (kg/Ha)	108
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	5
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	5,930
Porcentaje de la superficie fertilizada	100%

Sorgo forrajero verde	
Superficie del cultivo principal (Ha)	142
Requerimiento de N (kg/ton)	19.2
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	7.5
Requerimiento de N (kg/Ha)	144
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	6.6
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	944
Porcentaje de la superficie fertilizada	100%

Maíz grano

Superficie del cultivo principal (Ha)	123
Requerimiento de N (kg/ton)	22
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	5.5
Requerimiento de N (kg/Ha)	121
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	5.6
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	687
Porcentaje de la superficie fertilizada	100%

Soya industrial

Superficie del cultivo principal (Ha)	125
Requerimiento de N (kg/ton)	80
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	3.3
Requerimiento de N (kg/Ha, 80 t/Ha)	264
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	12.2
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie sembrada de maíz de grano en DR003 (t ST/año)	1524
Porcentaje de la superficie fertilizada	100%

Zacate

Superficie del cultivo principal (Ha)	205
Requerimiento de N (kg/ton)	8.2
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	5.4
Requerimiento de N (kg/Ha, 80 t/Ha)	44.5
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	2
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie sembrada de maíz de grano en DR003 (t ST/año)	421
Porcentaje de la superficie fertilizada	80%

Distancia (km)	138
----------------	-----

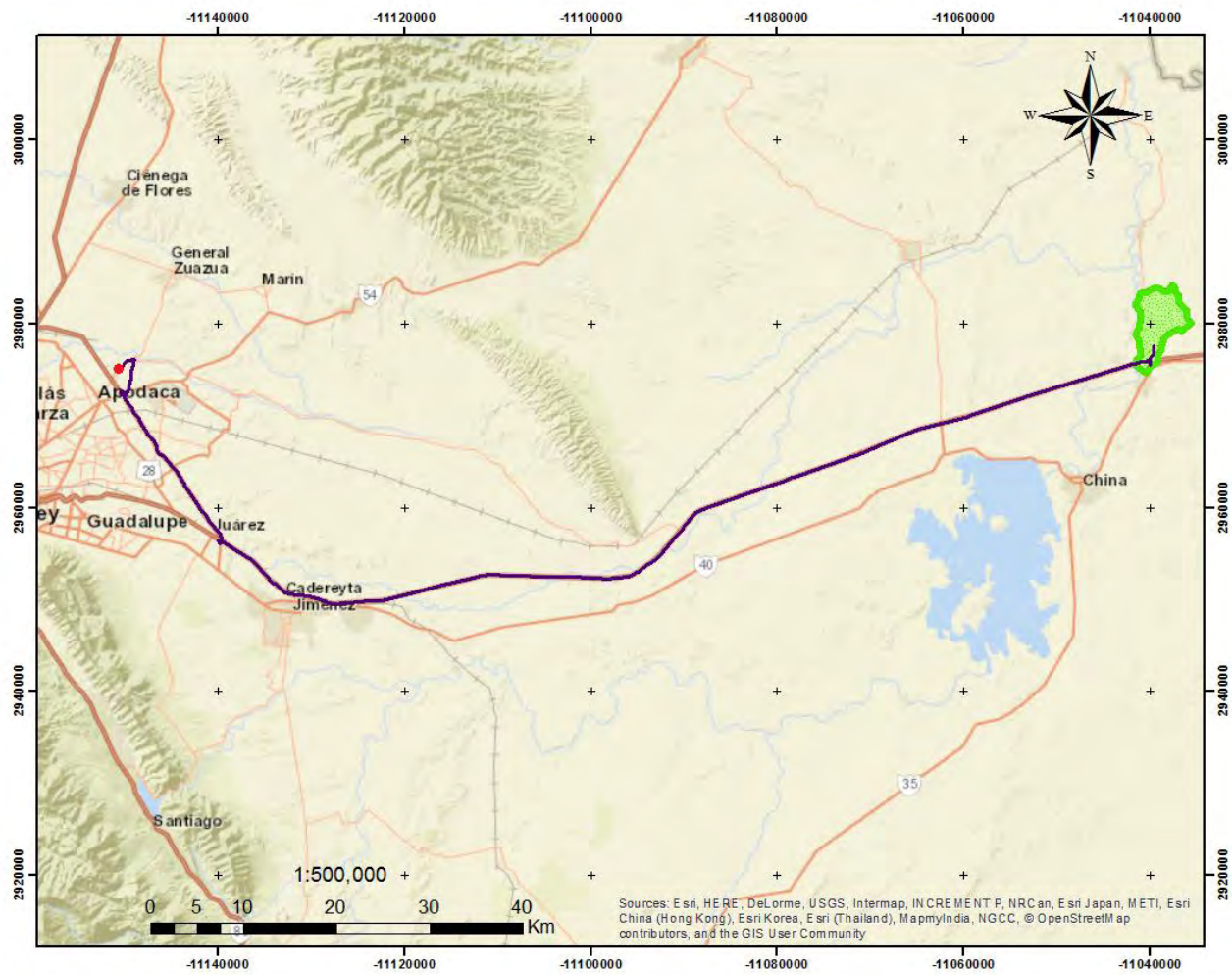


Figura 33. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Noreste al DR031

13.12 PTAR Tierra Negra, Ciudad Madero, Tamaulipas

Tabla 48. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Tierra Negra

PTAR	
Proceso	Lodos Activados
Q _{instalado} (L/s)	1,800
Q _{tratado} (L/s)	1,200
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	9,110
Distrito de Riego	
Nombre	DR092A Río Pánuco U-Las Ánimas, Tamps.
Superficie total (Ha)	37,388
Cultivos principales	Sorgo grano
Superficie del cultivo principal (Ha)	10,202
Requerimiento de N (kg/ton)	30
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	2.4
Requerimiento de N (kg/Ha)	73.5
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	3.4
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	34,630
Porcentaje de la superficie fertilizada	26%
Distancia (km)	123

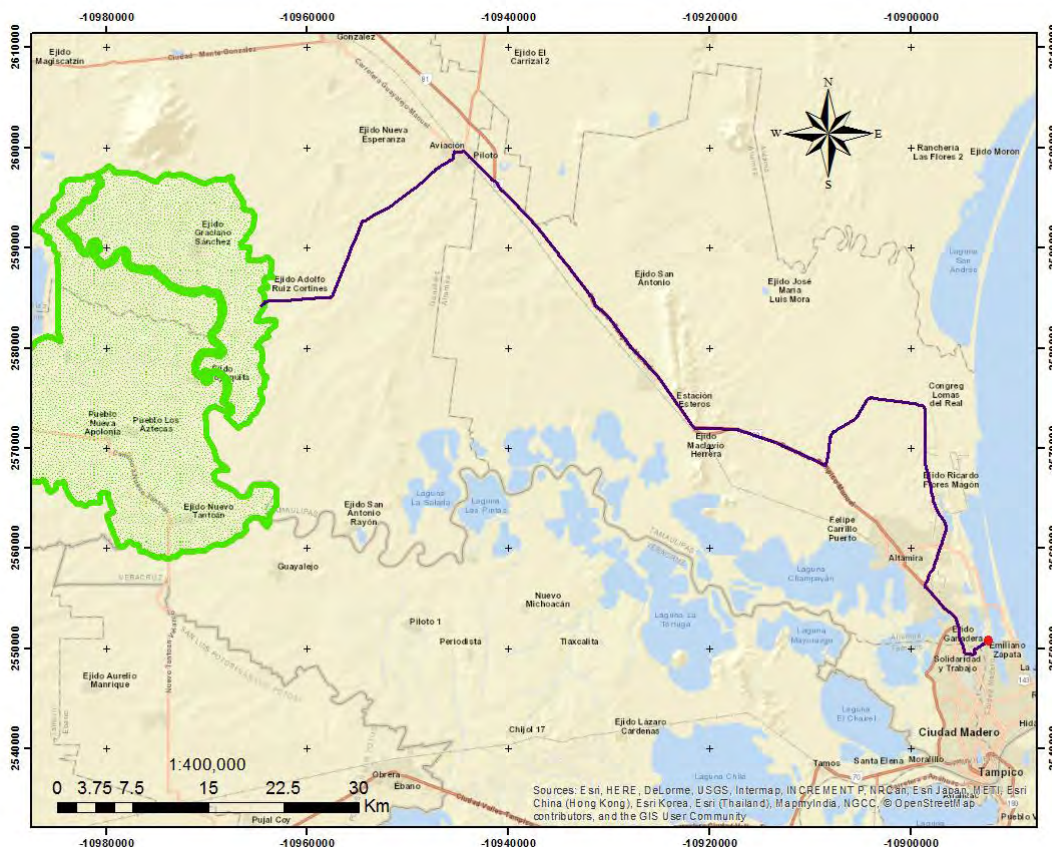


Figura 34. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Tierra Negra al DR092A

13.13 PTAR Playa Norte, Veracruz, Veracruz

Tabla 49. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Playa Norte

PTAR	
Proceso	Filtros biológicos
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	1,600
Q_{tratado} (L/s)	1,600
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	12,147

Distrito de Riego	
Nombre	DR035 La Antigua, Veracruz
Superficie total (Ha)	22,264
Cultivos principales	Caña de azúcar
Superficie del cultivo principal (Ha)	18,965
Requerimiento de N (kg/ton)	1.3
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	98.3
Requerimiento de N (kg/Ha)	127,855

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	5.9
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	111,983
Porcentaje de la superficie fertilizada	11%
Distancia (km)	30

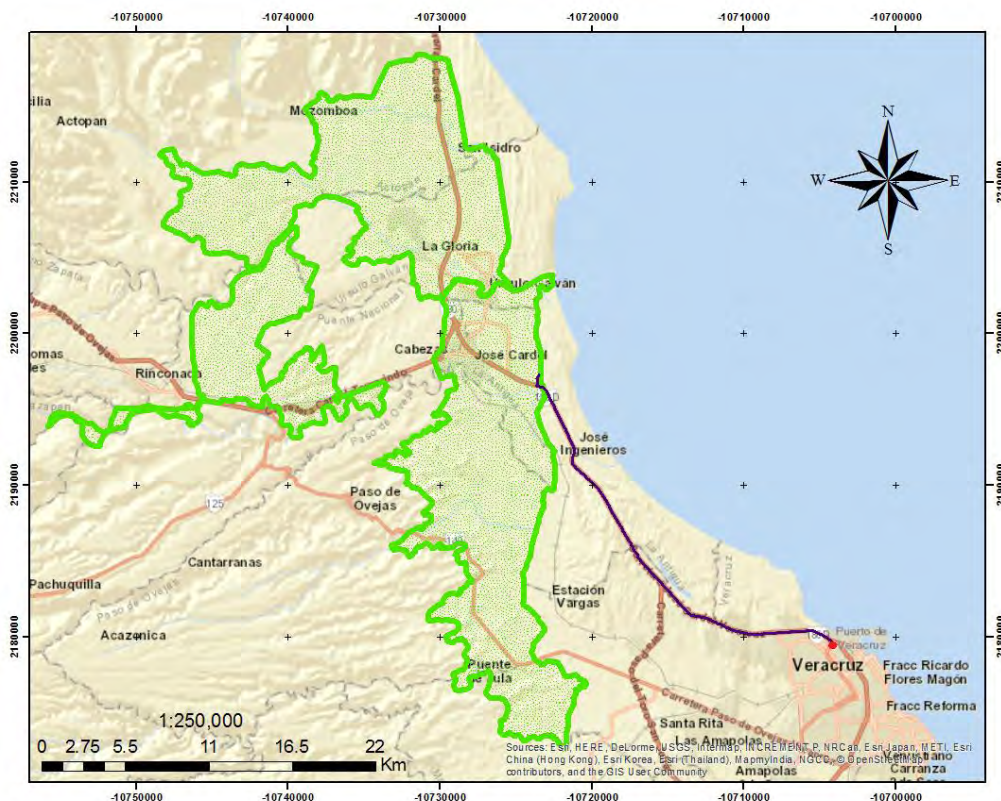


Figura 35, Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Playa Norte al DR035

13.15 PTAR Norte, Ciudad Juárez, Chihuahua

Tabla 51. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Norte

PTAR	
Proceso	Lodos activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	1,600
Q_{tratado} (L/s)	1,350
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	10,249

Distrito de Riego	
Nombre	DR009 Valle de Juárez, Chihuahua
Superficie total (Ha)	9,780
Cultivos principales	Algodón
Superficie del cultivo principal (Ha)	4,709
Requerimiento de N (kg/ton)	120
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	2.9
Requerimiento de N (kg/Ha)	348

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	16
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	75,681
Porcentaje de la superficie fertilizada	13%
Distancia (km)	1

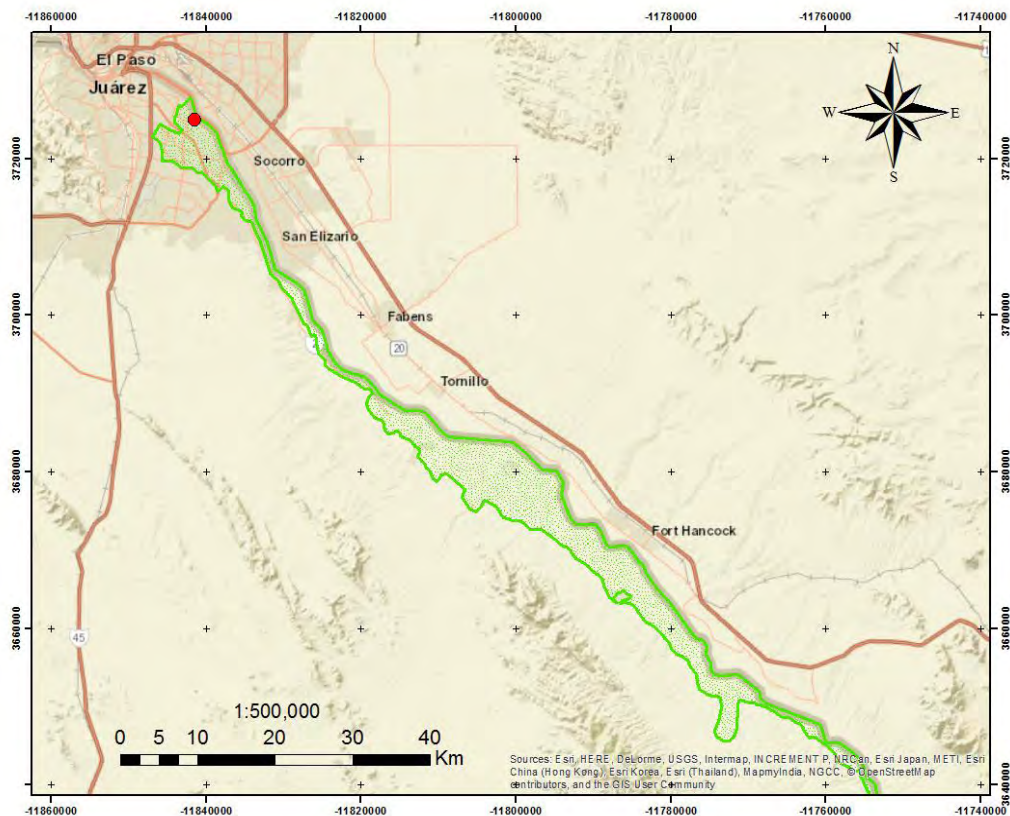


Figura 37. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Norte al DR009

13.16 PTAR Nuevo Laredo, Nuevo Laredo, Tamaulipas

Tabla 52. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Nuevo Laredo

PTAR	
Proceso	Lodos activados
Q _{instalado} (L/s)	1,360
Q _{tratado} (L/s)	895
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	6,796

Distrito de Riego	
Nombre	DR050 Acuña-Falcón, Tamaulipas
Superficie total (Ha)	2,320
Cultivos principales	Sorgo forrajero verde
Superficie del cultivo principal (Ha)	494
Requerimiento de N (kg/ton)	19.2
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	23.5
Requerimiento de N (kg/Ha)	451.2

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	20.8
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	10,294
Porcentaje de la superficie fertilizada	66%
Distancia (km)	1

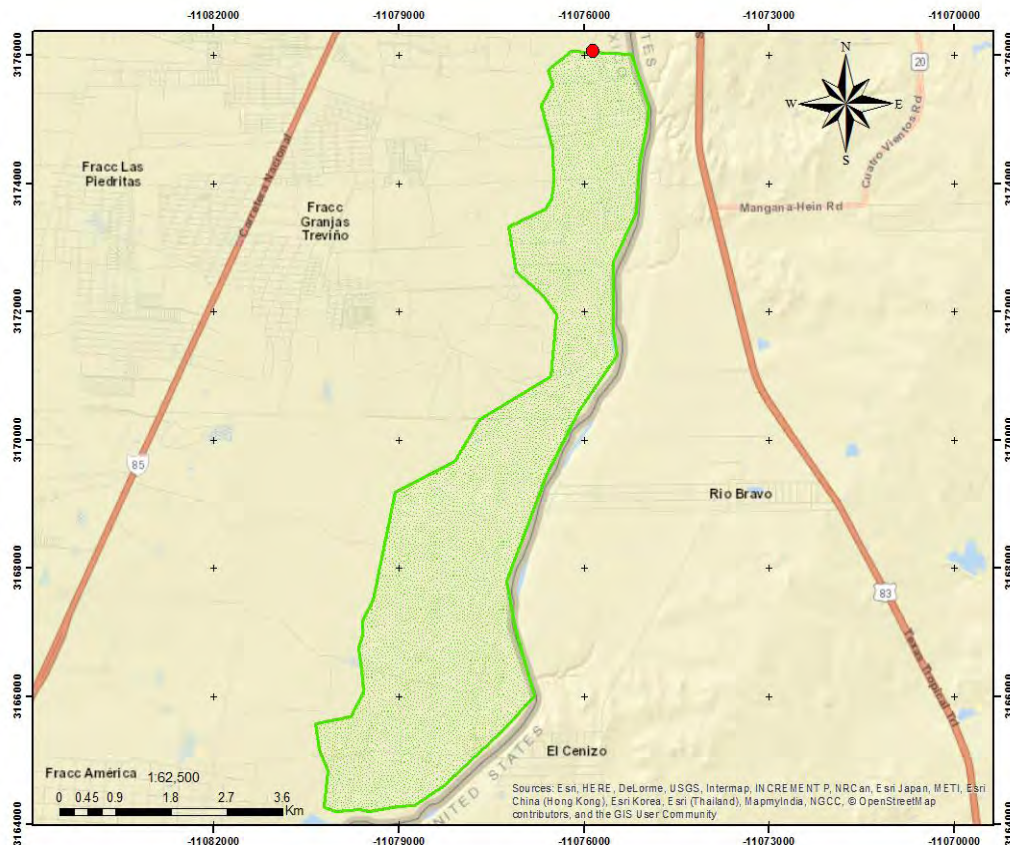


Figura 38. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Nuevo Laredo al DR050

13.17 PTAR Aguas Blancas, Acapulco, Guerrero

Tabla 53. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Aguas Blancas

PTAR	
Proceso	Lodos activados
Q _{instalado} (L/s)	1,350
Q _{tratado} (L/s)	1,350
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	10,249.2

Distrito de Riego	
Nombre	DR105 Nexpa, Guerrero
Superficie total (Ha)	3,886
Cultivos principales	Maíz grano Zacate

Maíz grano (Riego Otoño-Invierno)	
Superficie del cultivo principal (Ha)	697
Requerimiento de N (kg/ton)	22
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	5
Requerimiento de N (kg/Ha)	110
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	5.1
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	3,541
Porcentaje de la superficie fertilizada	100%

Maíz grano (Riego Primavera-Verano)	
Superficie del cultivo principal (Ha)	324
Requerimiento de N (kg/ton)	22
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	5
Requerimiento de N (kg/Ha, 80 t/Ha)	110
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	5.1
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	1,646
Porcentaje de la superficie fertilizada	100%

Zacate	
Superficie del cultivo principal (Ha)	856
Requerimiento de N (kg/ton)	8.2
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	20
Requerimiento de N (kg/Ha)	164.8
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	7.6
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	6,515
Porcentaje de la superficie fertilizada	78%

Distancia (km)	81
----------------	----



Figura 39. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Aguas Blancas al DR105

13.18 PTAR Toluca Norte, Toluca, Estado de México

Tabla 54. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Toluca Norte

PTAR	
Proceso	Dual (Filtros biológicos-Lodos activados)
Q _{instalado} (L/s)	1,280
Q _{tratado} (L/s)	1,200
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	9,110.4

Distrito de Riego	
Nombre	DR033 Edo. Méx, Edo. Méx.
Superficie total (Ha)	6,789
Cultivos principales	Maíz grano
Superficie del cultivo principal (Ha)	6,252
Requerimiento de N (kg/ton)	22
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	3
Requerimiento de N (kg/Ha)	66

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.65
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	3.05
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	19,056.54
Porcentaje de la superficie fertilizada	47.8%
Distancia (km)	74.95

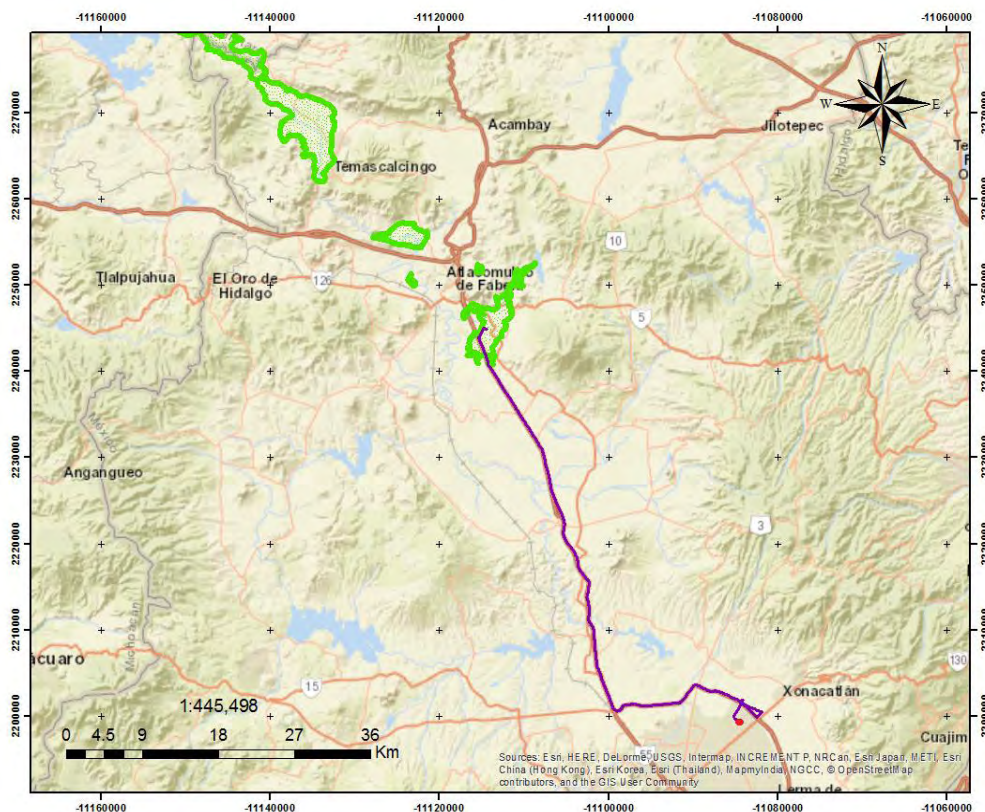


Figura 40. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Toluca Norte al DR033

13.19 PTAR Morelia, Morelia, Michoacán

Tabla 55. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Morelia

PTAR	
Proceso	Lodos activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	1,200
Q_{tratado} (L/s)	1,100
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	8,351

Distrito de Riego	
Nombre	DR020 Morelia, Michoacán
Superficie total (Ha)	18,222
Cultivos principales	Maíz grano
Superficie del cultivo principal (Ha)	7,469
Requerimiento de N (kg/ton)	22
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	6.2
Requerimiento de N (kg/Ha)	137.1

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	6.3
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	47,277
Porcentaje de la superficie fertilizada	18%
Distancia (km)	2

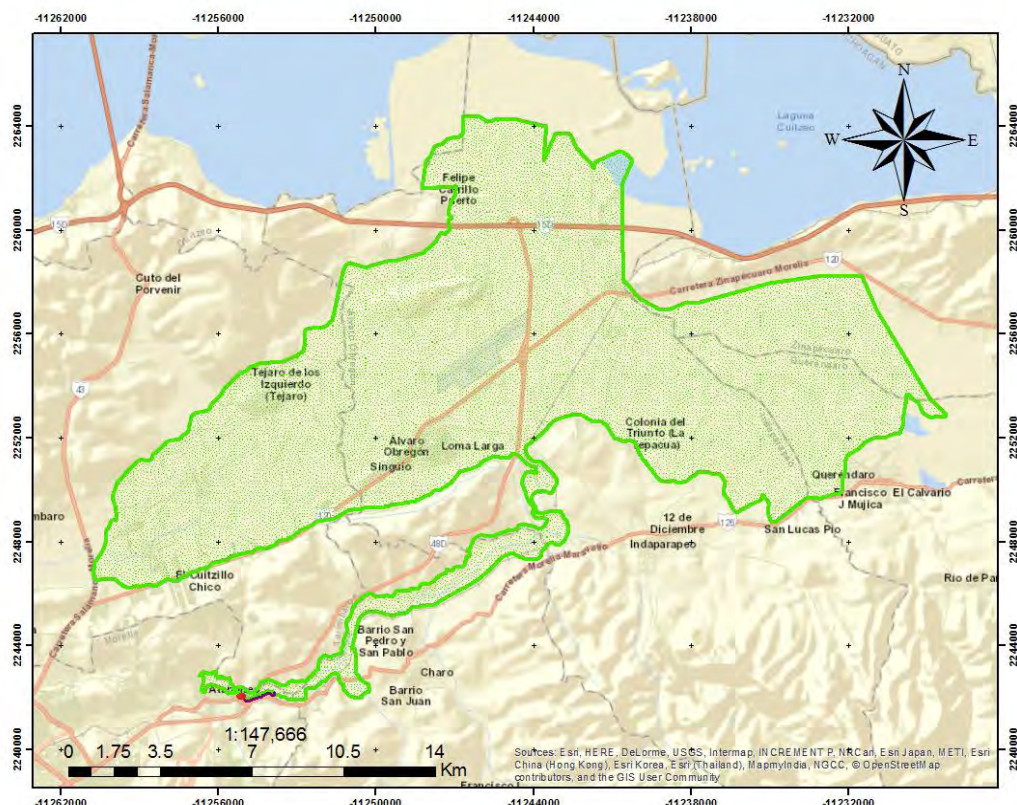


Figura 41. Mapa de acarreos de biosólidos de la PTAR Morelia al DR020

13.20 PTAR Principal, Saltillo, Coahuila

Tabla 56. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Principal

PTAR	
Proceso	Lodos activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	1,200
Q_{tratado} (L/s)	900
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	6,833

Distrito de Riego	
Nombre	DR017 Región Lagunera, Coah-Dgo.
Superficie total (Ha)	47,845
Cultivos principales	Nogal (nuez)
Superficie del cultivo principal (Ha)	4,894
Requerimiento de N (kg/ton)	30
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	1.9
Requerimiento de N (kg/Ha)	57.9

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	2.7
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	13,086
Porcentaje de la superficie fertilizada	52%
Distancia (km)	241

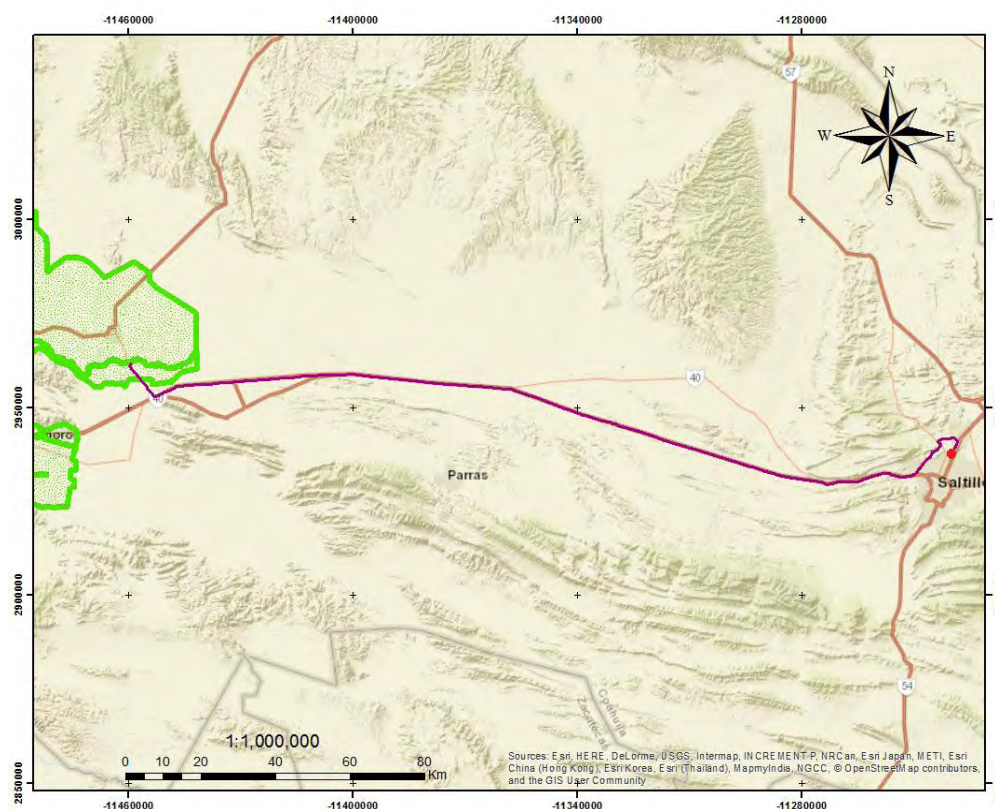


Figura 42. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Principal al DR017

13.22 PTAR Norte, Chihuahua, Chihuahua

Tabla 58. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Chihuahua

PTAR	
Proceso	Lodos activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	1,200
Q_{tratado} (L/s)	430
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	3,263

Distrito de Riego	
Nombre	DR005 Delicias, Chihuahua
Superficie total (Ha)	54,096
Cultivos principales	Nogal (nuez)
Superficie del cultivo principal (Ha)	8,302
Requerimiento de N (kg/ton)	30
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	1.5
Requerimiento de N (kg/Ha)	44

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	2
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie sembrada de maíz de grano en DR003 (t ST/año)	17,023
Porcentaje de la superficie fertilizada	19%
Distancia (km)	80

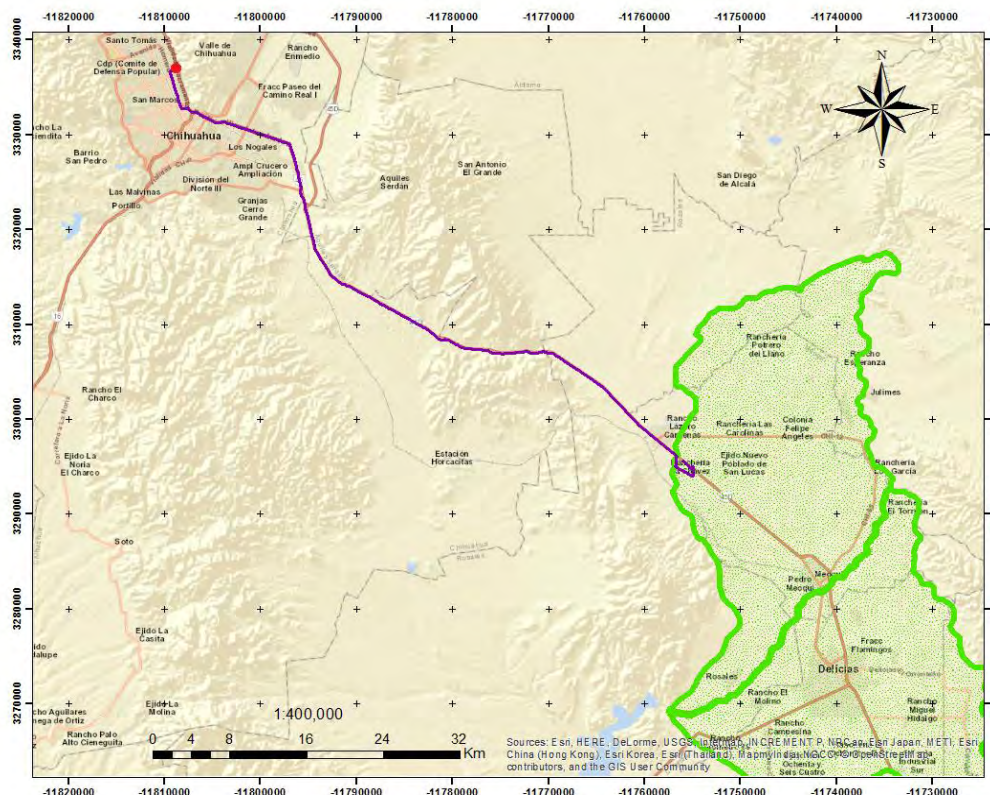


Figura 44. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Norte al DR005

13.23 PTAR SEAPAL Norte II, Puerto Vallarta, Jalisco

Tabla 59. Ficha de resultados del análisis de la PTAR SEAPAL Norte II

PTAR	
Proceso	Lodos activados
Q _{instalado} (L/s)	1,125
Q _{tratado} (L/s)	890
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	6,757
Distrito de Riego	
Nombre	DR105 Tomatlán, Jalisco
Superficie total (Ha)	10,872
Cultivos principales	Arroz grano
Arroz grano (Riego Otoño-Invierno)	
Superficie del cultivo principal (Ha)	893
Requerimiento de N (kg/ton)	22.2
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	5.1
Requerimiento de N (kg/Ha)	113.2
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	5.2
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	4,669
Porcentaje de la superficie fertilizada	100%
Maíz grano (Riego Primavera-Verano)	
Superficie del cultivo principal (Ha)	881
Requerimiento de N (kg/ton)	22.2
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	5
Requerimiento de N (kg/Ha)	111
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	5.1
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	4,516
Porcentaje de la superficie fertilizada	45%
Distancia (km)	111

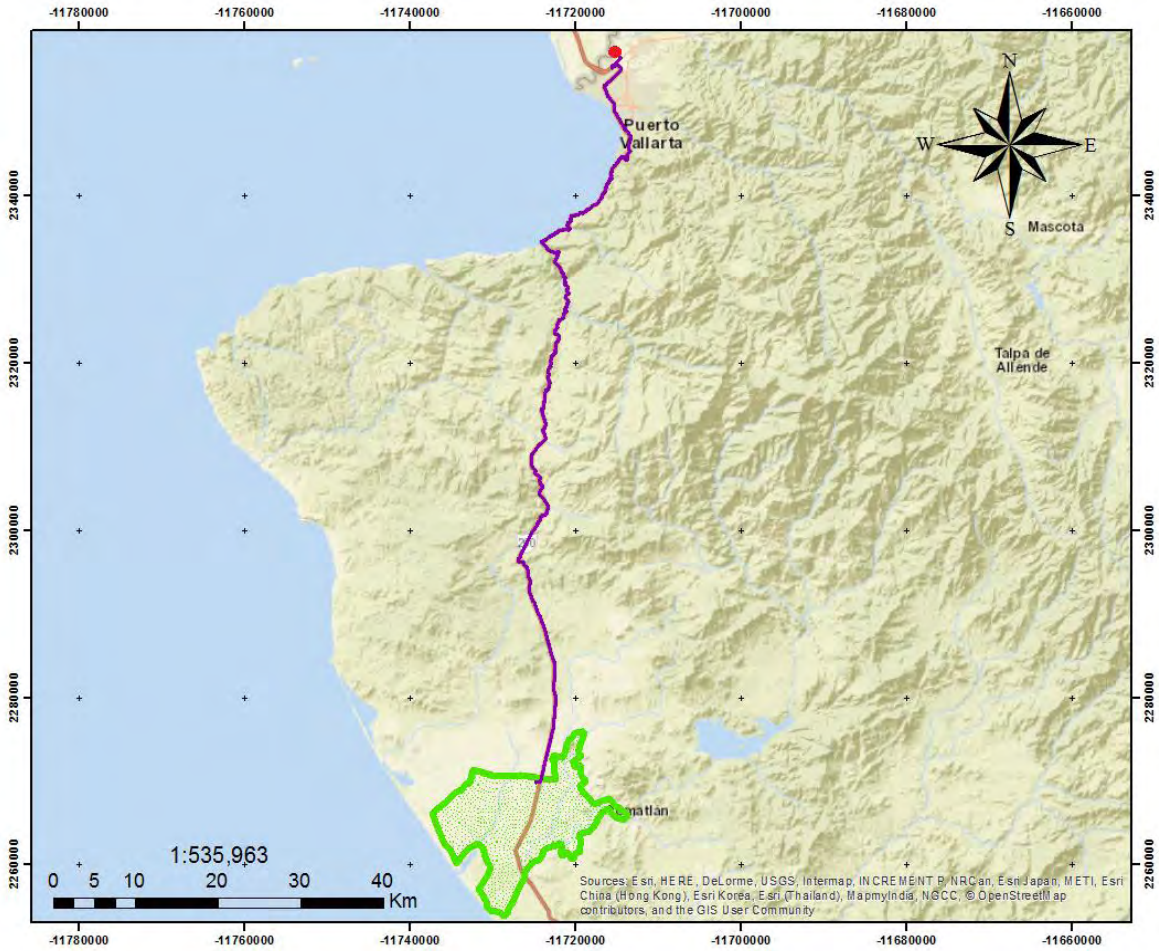


Figura 45. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR SEAPAL Norte II al DR105

13.24 PTAR Puebla San Francisco, Puebla, Puebla

Tabla 60. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Puebla San Francisco

PTAR	
Proceso avanzado	Primario
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	1,100
Q_{tratado} (L/s)	1,292
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	9,808

Distrito de Riego	
Nombre	DR030 Valsequillo, Puebla
Superficie total (Ha)	21,322
Cultivos principales	Maíz grano
Superficie del cultivo principal (Ha)	15,111
Requerimiento de N (kg/ton)	22
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	7.1
Requerimiento de N (kg/Ha)	156.4

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	16.1
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	9.7
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	146,811
Porcentaje de la superficie fertilizada	7%
Distancia (km)	56

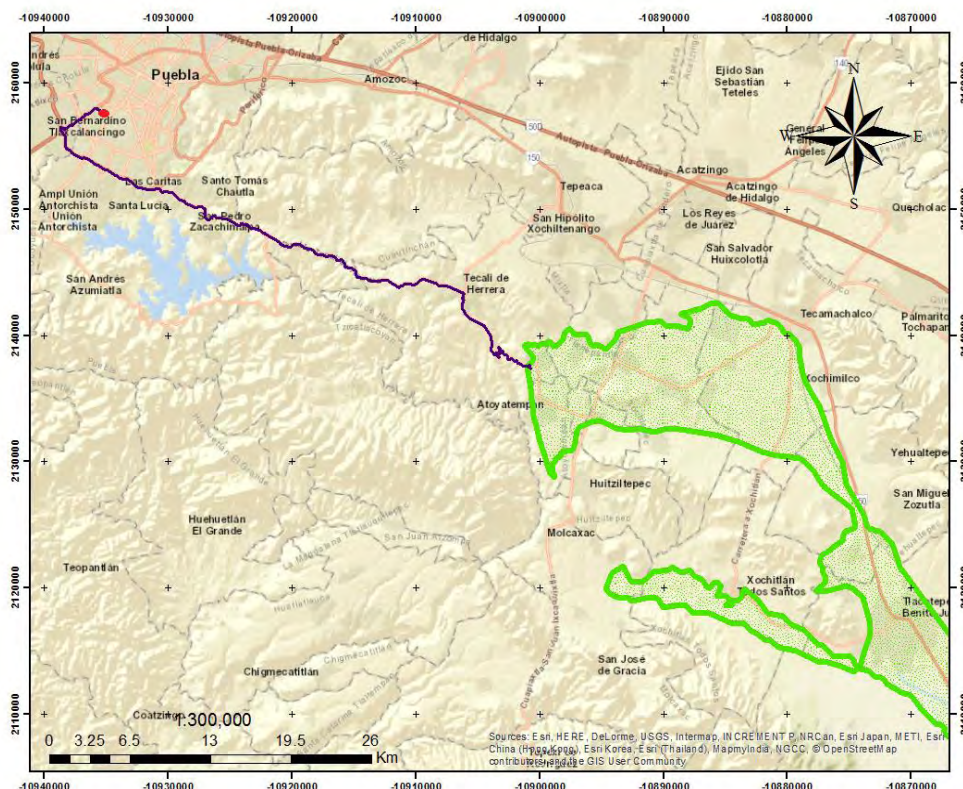


Figura 46. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Puebla San Francisco al DR030

13.25 PTAR Bincacional, Tijuana, Baja California

Tabla 61. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Binacional

PTAR	
Proceso	Lodos activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	1,100
Q_{tratado} (L/s)	1,076.4
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	8,172
Distrito de Riego	
Nombre	DR014 Río Colorado, BC-Son.
Superficie total (Ha)	184,909
Cultivos principales	Sorgo grano
Superficie del cultivo principal (Ha)	3,272
Requerimiento de N (kg/ton)	30
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	4.9
Requerimiento de N (kg/Ha)	147.9
N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	6.8
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	22,349
Porcentaje de la superficie fertilizada	37%
Distancia (km)	212

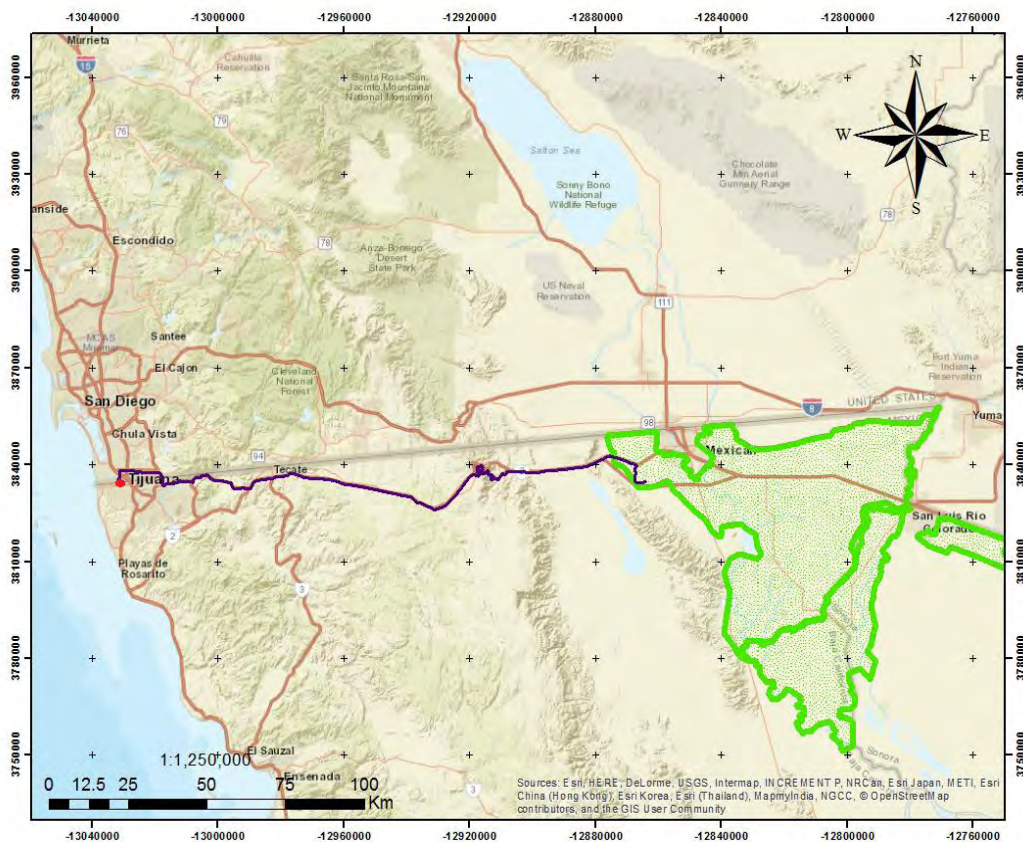


Figura 47. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Binacional al DR014

13.26 PTAR Tanque Tenorio, San Luis Potosí, San Luis Potosí

Tabla 62. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Tanque Tenorio

PTAR	
Proceso	Dual (Lodos activados-Primario avanzado)
Q _{instalado} (L/s)	1,080
Q _{tratado} (L/s)	1,000
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	7,592

Distrito de Riego	
Nombre	DR049 Río Verde, SLP
Superficie total (Ha)	2,854
Cultivos principales	Maíz elotero
Superficie del cultivo principal (Ha)	797
Requerimiento de N (kg/ton)	22
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	12
Requerimiento de N (kg/Ha)	264

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.65
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	12.19
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	9,717
Porcentaje de la superficie fertilizada	78%
Distancia (km)	126

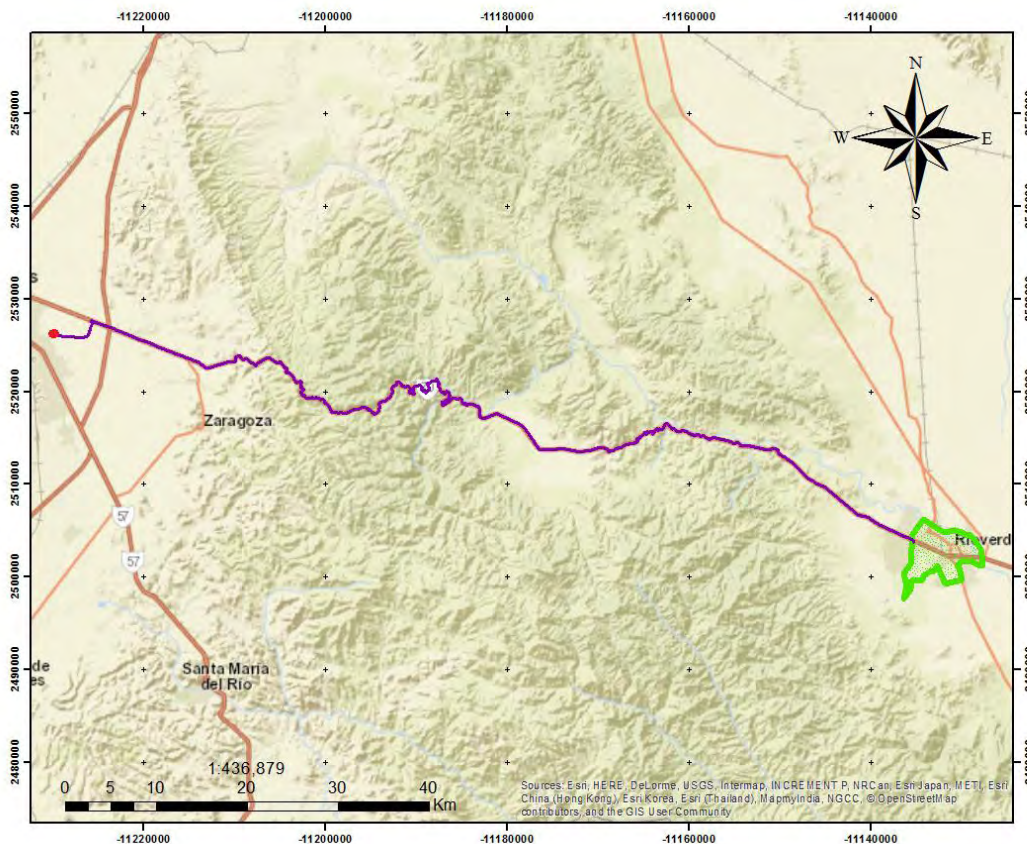


Figura 48. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Tanque Tenorio al DR049

13.27 PTAR Toluca Oriente, Toluca, Estado de México

Tabla 63. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Toluca Oriente

PTAR	
Proceso	Lodos activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	1,000
Q_{tratado} (L/s)	891
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	6,763

Distrito de Riego	
Nombre	DR033 Edo Méx, Edo Méx
Superficie total (Ha)	6,786
Cultivos principales	Maíz grano
Superficie del cultivo principal (Ha)	6,252
Requerimiento de N (kg/ton)	22
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	3
Requerimiento de N (kg/Ha)	66

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	3
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie (t ST/año)	19,056
Porcentaje de la superficie fertilizada	35%
Distancia (km)	82

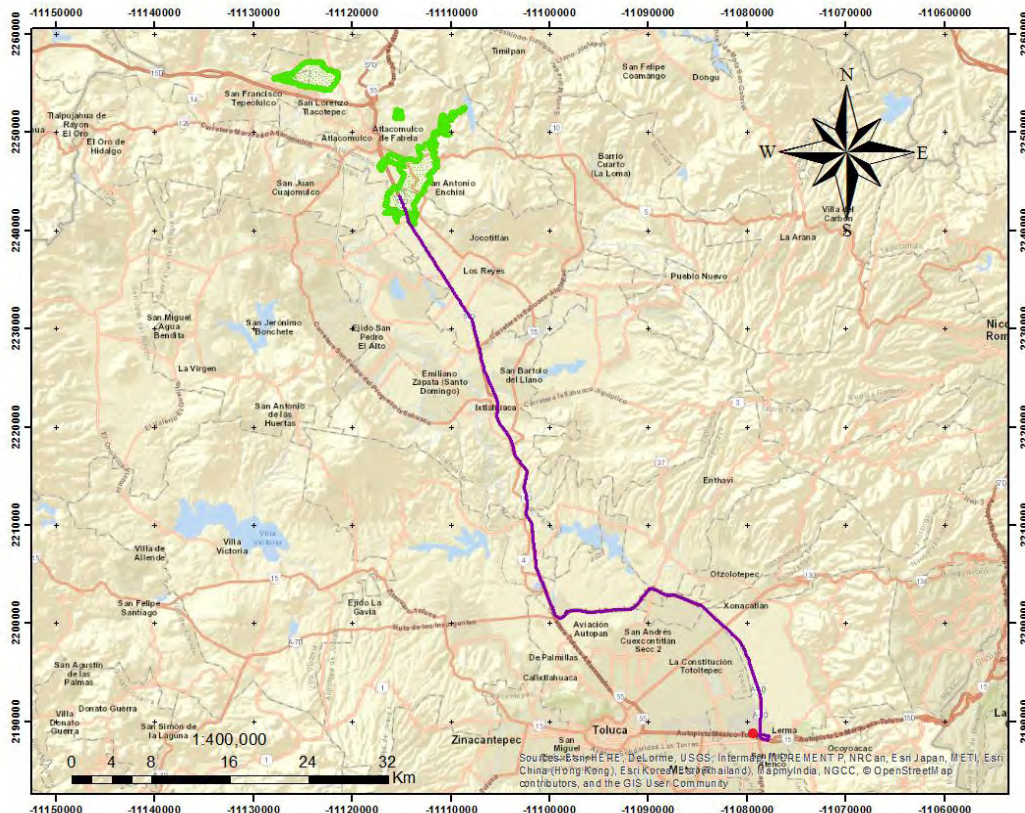


Figura 49. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Toluca Oriente al DR033

13.28 PTAR Lago de Texcoco I, Chimalhuacán, Estado de México

Tabla 64. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Lago de Texcoco I

PTAR	
Proceso	Lodos activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	1,000
Q_{tratado} (L/s)	800
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	6,074

Distrito de Riego	
Nombre	DR088 Chiconautla, Edo Méx
Superficie total (Ha)	1,728
Cultivos principales	Maíz forrajero verde
Superficie del cultivo principal (Ha)	1,202
Requerimiento de N (kg/ton)	12.7
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	80
Requerimiento de N (kg/Ha)	1,014

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	46.8
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie sembrada de maíz de grano en DR003 (t ST/año)	56,267
Porcentaje de la superficie fertilizada	11%
Distancia (km)	26

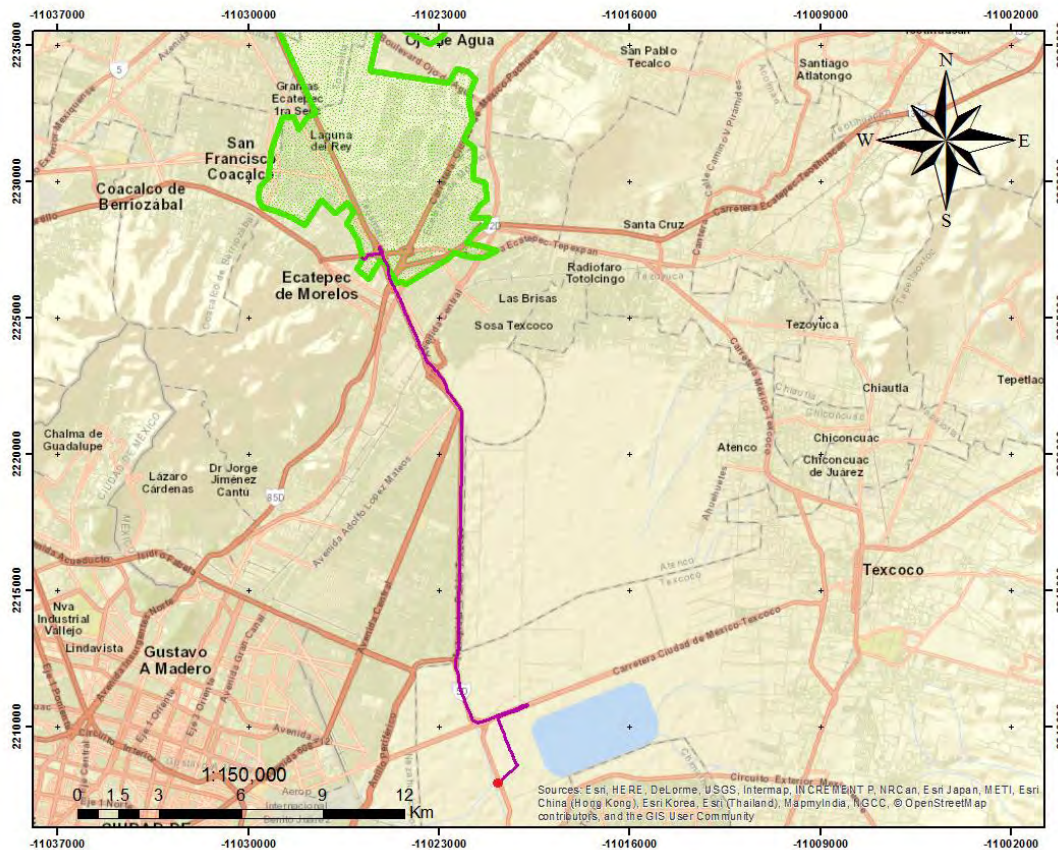


Figura 50. Mapa de acarreo de biosólidos de la PTAR Lago de Texcoco I al DR088

13.29 PTAR Reynosa I, Reynosa, Tamaulipas

Tabla 65. Ficha de resultados del análisis de la PTAR Reynosa I

PTAR	
Proceso	Lodos activados
$Q_{\text{instalado}}$ (L/s)	1,000
Q_{tratado} (L/s)	850
Masa de lodo/año estimada (t ST/año)	6,453

Distrito de Riego	
Nombre	DR025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas
Superficie total (Ha)	198,366
Cultivos principales	Sorgo grano
Superficie del cultivo principal (Ha)	11,598
Requerimiento de N (kg/ton)	30
Rendimiento de cultivo (t/Ha)	4.5
Requerimiento de N (kg/Ha)	134

N disponible total (LP + LA), (kg/t)	21.6
Tasa de aplicación de lodo (t ST/ha/año)	6.2
Cantidad de lodos requerida para fertilizar la superficie sembrada de maíz de grano en DR003 (t ST/año)	71,828
Porcentaje de la superficie fertilizada	9%
Distancia (km)	21

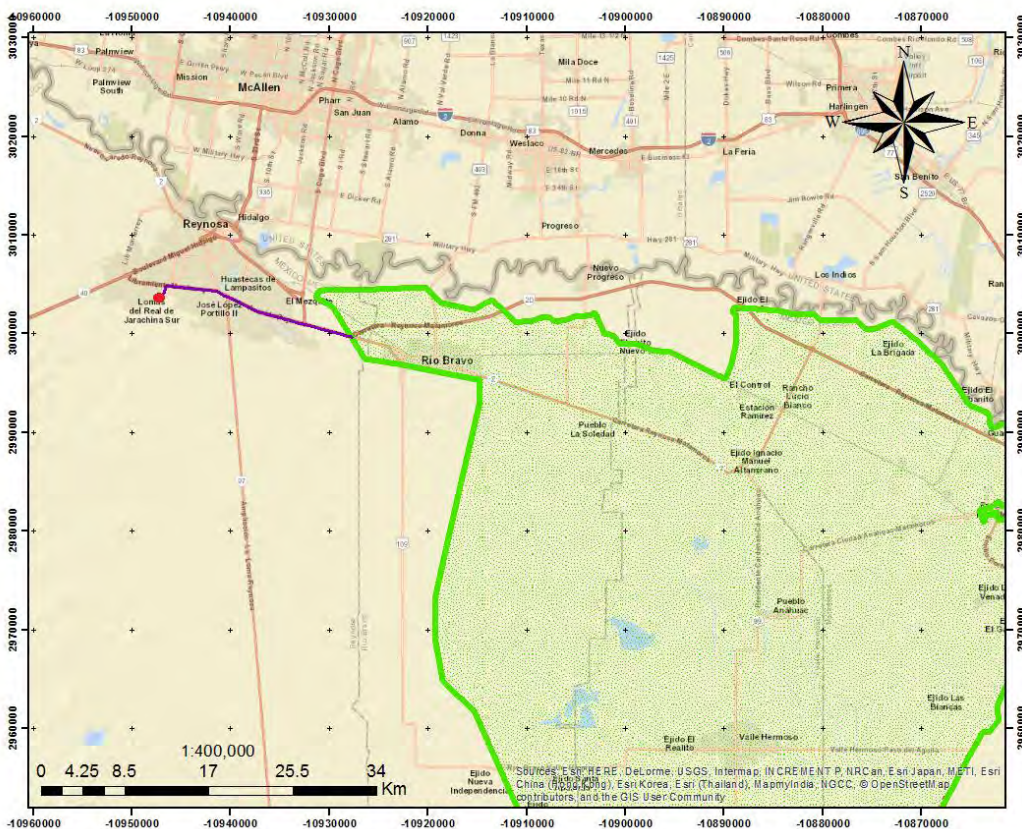


Figura 51. Mapa de acarreos de biosólidos de la PTAR Reynosa I al DR025