



El Colegio de la Frontera Norte

APROVECHAMIENTO DE LODOS RESIDUALES PARA CERRAR EL CICLO URBANO DEL AGUA, MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y REDUCIR LOS GEI: CASO DE LA PITAR NUEVO LAREDO.

Tesis presentada por

Perla Alejandra Blanco Jara

Para obtener el grado de

Maestra en Gestión Integral del Agua

Monterrey, Nuevo León; México

2014

Constancia de aprobación de tesis

Director de Tesis:

Dr. Ismael Aguilar Benítez

Aprobada por el Jurado Examinador:

1. _____

2. _____

3. _____



Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a Dios, a toda mi familia y a todas las personas que han aportado algo para ser la persona que soy.



Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por los recursos invertidos en mi estudio de maestría.

De igual forma agradezco al Colegio de la Frontera Norte por la oportunidad y confianza que me brindo para realizar este programa académico.

También agradezco a la Comisión Municipal de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Nuevo Laredo, Tamaulipas. Especialmente al Ingeniero Juan Carlos Pérez Faz, por las facilidades para recopilar información necesaria para el proyecto.

Al Ing. Agustín Boone González delegado del CILA Comisión Internacional de Límites y Aguas en Nuevo Laredo, por su apoyo para acceder a información para este trabajo.

Así mismo agradezco al Ing. David Negrete por sus observaciones oportunas para mejorar este trabajo.

Al Dr. Ismael Aguilar Benítez por su apoyo y guía para realizar este trabajo, sin sus valiosos aportes, incluidas llamadas de atención y regaños no hubiera sido posible.

Mi agradecimiento al Dr. Rigoberto García lector interno de mi trabajo por su ayuda.

No menos importantes son mis agradecimientos a todo el personal del Colef Monterrey por su apoyo incondicional.



Resumen

Español

A pesar de que la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo, Tamaulipas tiene una buena calidad en el efluente y un consumo energético bajo, el manejo actual de sus lodos residuales, genera algunos problemas operativos y de sostenibilidad. Por ejemplo, emite grandes cantidades de gases de efecto invernadero, así como que los lodos son considerados desechos. Por esa razón se propone el aprovechamiento de los lodos residuales para la generación de energía, a partir del biogás por medio de la digestión anaerobia. Con la implementación de esta propuesta no solamente se vería mejorado el manejo de los lodos, al disminuir su volumen, sino que disminuirían las emisiones de gases de efecto invernadero y mejoraría la eficiencia de la planta. Aunado a esto se vería beneficiado el ciclo urbano del agua de Nuevo Laredo y el ciclo hidrológico del Río Bravo por la reincorporación de los lodos a procesos productivos lo que favorece la sostenibilidad del ciclo urbano del agua en Nuevo Laredo.

Palabras Clave: Lodos residuales, Generación de Energía, Eficiencia, Ciclo Urbano del Agua, sostenibilidad.

English

Although the International Wastewater Treatment Plant of Nuevo Laredo, Tam. (IWWTPNL) shows a good quality in its effluent and an efficient use of energy, the current management of sludge generates environmental problems such as emissions of large amounts of greenhouse gases, also the sludge are considered as waste. In this study we propose the reuse of sludge to generate energy, through the generation of biogas by utilizing anaerobic digestion. The reuse of sludge would reduce greenhouse gases emissions and consequently, it would improve the performance and sustainability of the IWWTPNL. In addition the sludge reuse would contribute to reinstate it into the urban water cycle; in the usual approach sludges are considered as a

leftover. This action may contribute to close the urban water cyclic and favors the sustainability of the IWWTPNL.

Key Words: Sludge, Energy Generation, operating performance, urban water cycle.



Índice General

Constancia de aprobación de tesis.....	2
Dedicatoria	3
Agradecimientos.....	4
Resumen	5
Español	5
English.....	5
Índice General	7
Índice de Tablas	9
Índice de Gráficas.....	10
Glosario de Siglas y Términos	12
Capítulo I. Introducción	13
1.1. Agua y energía, en el ciclo urbano del agua.....	13
1.2. Planteamiento del Problema	15
1.3. Pregunta Problema.....	16
General	16
Secundarias.....	16
1.4. Objetivos.....	17
General	17
Específicos	17
1.5. Hipótesis.....	17
General	17
Secundarias.....	17
1.6. Metodología.....	18

Capítulo II. Ciclo Urbano del Agua, sostenibilidad e interacciones agua y energía.	22
2.1 Ciclo Urbano del Agua.....	22
2.2 Sostenibilidad	29
2.3 Agua-Energía.....	31
Capítulo III. Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo, Tamaulipas. 37	
3.1 Nuevo Laredo, Tamaulipas.....	37
3.2 La Comisión Municipal para el Agua Potable y Saneamiento del Municipio de Nuevo Laredo Tamaulipas.....	39
Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo Tamaulipas	41
Capítulo IV. Manejo y aprovechamiento de los lodos residuales de la PITARNL: cumplimiento de la norma, la eficiencia energética y las emisiones de GEI.	51
4.1 Evaluación del manejo de lodos residuales de la PITARNL	56
4.2 Escenario cero de la PITARNL.....	60
Evaluación de la eficiencia de la PITARNL escenario cero	61
Emisiones de gases de efecto invernadero en el escenario cero	64
4.3 Escenario uno, aprovechamiento de los lodos residuales para la generación de energía	65
Evaluación de la eficiencia de la PITARNL escenario uno	65
Emisiones de gases de efecto invernadero escenario uno	70
Evaluación de los indicadores.	71
Capítulo V. Conclusiones	73
Bibliografía	77
Anexos	83
Anexo1. Guía de Temas para la entrevista semiestructurada para informantes claves.	83

Anexo2. Criterio para la evaluación del Manejo de Lodos, IMTA.	84
Anexo1. Calculo de la eficiencia de plantas tratadoras de aguas residuales. Basado en el libro de Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery de MetCalf & Eddy (MetCalf & Eddy, et al., 2013)	84
Anexo2. Calculo de emisiones de GEI. Basado en la Metodología propuesta por Daniel Nolasco para el BID (Nolasco, 2010).	86
Anexo3. Indicadores para determinar la mejor opción en el aprovechamiento de los lodos residuales de la PITAR Nuevo Laredo.....	88
Anexo4. Información proporcionada por la CILA mediciones puntuales de la PITARNL88	
Anexo5. Valores de puntuales de la PITAR con datos de Octubre del 2012.	92
Anexo6. Fotografías de la PITAR Nuevo Laredo.	95
Última página	103

Índice de Tablas

Tabla 1. Factor de emisiones de GEI toneladas de Dióxido de Carbono por Mega-Watt (Nolasco, 2010, p. 85).....	34
Tabla 2. Plantas de tratamiento de aguas residuales de Nuevo Laredo. Información proporcionada por la Comapa	40
Tabla 3. Parámetros que debe cumplir el efluente de la PITARNL.....	43
Tabla 4. Límites máximos permisibles de metales pesados en bio-sólidos de la NOM.004-SEMARNAT-2002.....	47
Tabla 5. Límites máximos permisibles para patógenos en lodos y bio-sólidos de la NOM-004-SEMARNART-2002.....	48
Tabla 6. Aprovechamiento de los bio-sólidos, NOM-004-SEMARNAT-2002.....	48
Tabla 7. Gasto energético de la PITARNL por áreas de proceso.	49
Tabla 8. Comparación de normas con datos del efluente Octubre del 2012. Datos proporcionados	

por la CILA.	51
Tabla 9. Evaluación del manejo de lodos de la PITARNL.	58
Tabla 10. Evaluación de los lodos residuales de la PITARNL en Marzo de 2013.	60
Tabla 11. Tiempo de retención de lodos recomendado para biodigestores de mezcla completa. (MetCalf & Eddy, et al., 2013, p. 1507).....	67
Tabla 12. Indicadores para la mejorar el impacto ambiental	71
Tabla 13. Criterio para la asignación de puntos en el manejo del tratamiento de aguas residuales por medio de zanjas de oxidación (González, 2011)	84
Tabla 14. Factor según la fuente de energía (MetCalf & Eddy, et al., 2013)	85
Tabla 15. Indicadores para el impacto ambiental. Elaboración propia.	88
Tabla 16. Datos del efluente de la PITARNL, Octubre 2012	89
Tabla 17. Datos del influente de la PITARNL, Octubre 2012.....	90
Tabla 18. Información de la lodos de purga de la PITARNL, Octubre 2012.	91
Tabla 19. Información de los lodos de purga de la PITARNL, Octubre 2012.....	91
Tabla 20. Eficiencia de la PITARNL para el escenario cero con datos de Octubre del 2012, manteniendo constante el consumo energético.	92
Tabla 21. Eficiencia de la PITARNL con datos de Octubre del 2012, manteniendo constante el consumo energético y la generación de energía, en el escenario uno.	93
Tabla 22. Producción de biogás con los sólidos volátiles suspendidos de los lodos de retorno. Datos de la PITARNL Octubre del 2012	94

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Ciclo urbano del agua. Elaboración propia	26
Gráfica 2. Evolución del consumo de energía per cápita en México 1971-2011 (Grupo del Banco Mundial, 2014)	31
Gráfica 3. Fuentes de energía en el mundo. Información (Sener, 2013).....	33
Gráfica 4. Fuentes renovables 2010. (Sener, 2013)	33
Gráfica 5. Ubicación geográfica de Nuevo Laredo, Tam. (EmbassyWorld.com Inc., 1998)	37

Gráfica 6. Estimación del crecimiento poblacional en Nuevo Laredo. Información	39
Gráfica 7. Cuenca del Río Bravo (COCEF, 2002)	42
Gráfica 8. Diagrama PITARNL. Elaboración propia.....	44
Gráfica 9. Diagrama de la propuesta de aprovechamiento de los lodos residuales para generar energía en la PITARNL. Elaboración propia.	56
Gráfica 10. Evaluación de la eficiencia. (MetCalf & Eddy, et al., 2013, p. 1816)	63
Gráfica 10. Evaluación de la eficiencia. (MetCalf & Eddy, et al., 2013, p. 1816)	86



Glosario de Siglas y Términos

ACV. Análisis de Ciclo de Vida.

BID. Banco Interamericano para el desarrollo.

CILA. Comisión Internacional de Límites y Aguas Sección México-Estados Unidos.

CH. Ciclo Hidrológico Natural.

CO₂. Dióxido de Carbono.

Comapa. Comisión Municipal de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Nuevo Laredo.

Conacyt. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Consumo Energético por m³. Kilowatt hora consumido para tratar un metro cubico de agua residual.

CUA. Ciclo Urbano del Agua.

Eficiencia de la planta. Es la eficiencia que contempla la calidad del efluente la remoción de materia orgánica, siendo el consumo energético la principal variable.

GIE. Gases de Efecto Invernadero.

IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Lodo residual/Lodos desecho. Se refiere al lodo que no tiene ningún uso para el funcionamiento de la planta de tratamiento, es decir se considera desecho, tiene que ser dispuesto fuera de la planta.

MDL. Mecanismos para el Desarrollo Limpio.

PITAR Nuevo Laredo/PITARNL/ PITAR. Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo.

Semarnat. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Sener. Secretaria de Energía

tonCO₂/año. Toneladas equivalentes de dióxido de carbono al año

UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México.

UNESCO. Organización de las Nacionales Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura.



Aprovechamiento de lodos residuales para cerrar el ciclo urbano del agua, mejorar la eficiencia energética y reducir los GEI: caso de la PITAR Nuevo Laredo.

Capítulo I. Introducción

1.1. Agua y energía, en el ciclo urbano del agua

El ciclo urbano del agua (CUA) puede analizarse de manera análoga al ciclo hidrológico natural (CH), con ciertas variaciones. El CUA implica procesos como el abastecimiento, potabilización, distribución dentro de las ciudades, uso, alcantarillado y el saneamiento del agua; los usos más comunes dentro del CUA son el uso doméstico, comercial e industrial aunque pueden existir diferencias según cada ciudad. Hay que destacar que los procesos del CUA demandan altas cantidades de energía para llevarse a cabo. La demanda energética para realizar los procesos que engloba el CUA, típicamente energía eléctrica, muestra la relación entre agua y energía; se estima que el 8% de la energía generada en todo el mundo, es usada para el bombeo, tratamiento y transporte del agua (FAO, 2014). Por otro lado se cree que el 90% de la generación de electricidad a nivel mundial demanda grandes cantidades de agua (ONU, 2014).

Cada ciudad tiene sus propias particularidades, en cuanto a población, actividades económicas, así como los ecosistemas colindantes. Por ejemplo para el abastecimiento la fuente de agua puede ser subterránea o superficial; en ambos casos se requieren suministro de energía, pero en distintas cantidades. Cuando el agua llega a las plantas potabilizadoras, en las cuales por medio de tecnologías el agua se hace potable; estas tecnologías demandan nuevamente energía. Posteriormente se realiza la distribución, la cual consiste en llevar el agua potable a los diferentes usuarios; con el uso de energía eléctrica cuando requiere de bombeo. Posterior al uso, se requiere contar con sistema de alcantarillado, para recolectar y transportar las aguas residuales hasta las plantas de tratamiento; este proceso usualmente no necesita energía ya que se da por gravedad, pero hay entrada de materiales por los diversos usos del agua. Por último está el saneamiento, en el cual se retiran la materia proveniente de los usos del agua; durante este proceso hay suministro de energía, salida de agua y materia concentrada.

Los típicos usos que se le dan al agua potable dentro del CUA son doméstico, comercial e

industrial. Dichos usos tienen algunas dinámicas que se interrelacionan dentro de las ciudades relativas a agua y energía (Barrios, 2012). Determinar los usos dentro de la ciudad es importante ya que el tipo de usos es la principal variable para la caracterización de las aguas residuales generadas. La calidad de las aguas de residuales, es inferior en comparación a la calidad del agua potable, y según ciertos estándares es considerada agua contaminada que puede afectar al medio ambiente. De ese modo obliga a que el agua antes de regresar a los ecosistemas debe pasar por un tratamiento secundario para retirar la materia orgánica y tratamiento terciarios para retirar los contaminantes tóxicos de ser necesario.

El saneamiento es un proceso importante dentro de los ecosistemas urbanos, ya que disminuye los riesgos sanitarios para todos los ecosistemas. Dentro del CUA el saneamiento del agua se lleva dentro de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR's). El alto gasto energético, los residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero¹ (GEI) son problemas comunes observados en las PTAR's. Por ejemplo, se estima que las PTAR's generan el 5% de las emisiones totales de metano en el mundo (Noyola, et al., 2013, p. 50). Por otro lado los residuos son relevantes considerando que el promedio mundial de producción de lodos secos al día es 30kg por persona² (Hospido, et al., 2009).

Se considera que el saneamiento del agua cierra el CUA con la reincorporación de las salidas a procesos productivos. Las PTAR's tiene dos salidas, el agua tratada y los lodos residuales. El agua, típicamente regresa a los ecosistemas, mientras que los lodos son dispuestos en rellenos sanitarios lo que representa una fuga de material y energía. Existen varios procesos para reutilizar los lodos de las PTAR's (Tyagi & Lo, 2013). Por ejemplo puede aprovecharse su potencial energético, por diversos métodos (Tabasová, et al., 2012), o utilizarse como fertilizante mediante el composteo (Ramírez, s.f.). Explotar el potencial energético de los lodos residuales es una posibilidad, si se tiene en cuenta que puede impactar en la eficiencia de la PTAR y en LA reducción de emisiones de GEI.

Como se aprecia la relación de agua y energía es sinérgica, están correlacionadas y ambos son temas políticos prioritarios por las repercusiones económicas y ecológicas que conllevan. Por un

¹ Los GEI que se establecieron en el protocolo de Kioto son, Dióxido de Carbono, Óxido Nitroso, Metano, Hidrofluorocarbonos, Perfluorocarbonos y Hexafluoruro de Azufre. (Solórzano Ochoa, 2003)

² Aunque ese valor puede ser muy arbitrario, da una clara idea del problema que representan los lodos, sin olvidar las aguas que no son tratadas. Por otro lado, Davis R. D., citado por Cao, menciona que en EUA la cantidad se eleva a 90kg de lodos al día por habitante (Cao & Pawlowski, 2012).

lado, si se exigen mejoras a los procesos del CUA, como el saneamiento, habrá un aumento en la demanda de energía. Por ejemplo, actualmente los organismos operadores en México dedican en promedio el 37% del total de los costos operativos para la energía eléctrica (INEGI, 2011). Así mismo se debe tener en cuenta que en la generación de energía eléctrica se emiten GEI. Las emisiones de GEI propician la alta variabilidad climática, que afecta principalmente al ciclo hidrológico. Se estima que México en 2008 emitió .466 toneladas de CO₂ por MW, (Alonso, et al., 2011). Se cree que esta tendencia aumentará al igual que la demanda de agua, ya que el agua es el vector energético de las termoeléctricas, que en 2011 representaron el 83% de la generación de energía en México (SENER, 2012). Es urgente atender los problemas del saneamiento mediante proyectos sostenibles, que permitan cerrar el CUA aprovechando los lodos residuales, aumentando la eficiencia de las PTAR's y reduciendo las emisiones de GEI.

1.2.Planteamiento del Problema

En este trabajo se analiza el caso de Nuevo Laredo, Tamaulipas; una ciudad ubicada en la frontera México-Estados Unidos, en el noreste de México. La principal actividad económica de Nuevo Laredo es terciaria, comercio y servicios (INEGI, 2013); por lo que el principal uso del agua en esa ciudad es el doméstico (Aguilar & Saphores, 2009). Para tratar las aguas residuales de Nuevo Laredo, se cuenta con 5 PTAR's. Una de ellas es la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales Nuevo Laredo (PITARNL). Esta planta es considerada eficiente pues la calidad del efluente cumple con los parámetros establecidos por la Comisión Internacional de Límites y Aguas división México-Estados Unidos (CILA); a diferencia de las PTARs en el interior del país, se aplican los parámetros establecidos por la CILA debido a que el efluente se descarga en la zona de inundación del Río Bravo, un cuerpo de agua internacional. En la PITARNL se pretende explorar la manera de aprovechar los lodos, disminuir las emisiones de GEI y mejorar la eficiencia de la planta.

La PITARNL es un caso relevante de estudio pues no solo es la planta más grande de Tamaulipas (CONAGUA, 2010), sino una de las más grandes de Norteamérica. Tiene capacidad para 1360 litros por segundo l/s de agua residual de típica doméstica. La PITARNL trata el 90% de las aguas residuales tratadas en Nuevo Laredo, no obstante la PITARNL trabaja alrededor del 65%

de su capacidad, generando en promedio 10 toneladas al día de lodos residuales típicos municipales. El manejo de estos lodos es inadecuado desde una perspectiva de CUA; pues no se contempla a los lodos como fuente de energía y materia, los lodos son considerados desechos. Para el funcionamiento actual la PITARNL demanda un consumo energético promedio mensual de 759,000 kWh, es decir consume 0.3427 kWh/m³ en promedio, que es similar al gasto de la Planta Tratadora de Aguas Residuales Noreste de Monterrey, en la que se tratan 1250 l/s y tiene un consumo de 0.301 kWh/m³³ (Chavarría, 2004).

$$\text{Consumo energético por m}^3 \text{ PITARNL} = \frac{759,000 \text{ kWh/mes}_{\text{promedio}}}{2'215,071.36 \text{ m}^3/\text{mes}} = 0.3427 \text{ kWh/m}^3$$

1.3. Pregunta Problema

General

¿Cómo el aprovechamiento de los lodos residuales de la PITARNL, puede contribuir a reducir la emisión de GEI y mejorar la eficiencia de la planta, desde una perspectiva de CUA?

Secundarias

1. ¿Cómo es el manejo actual de los lodos residuales de la PITARNL?
2. ¿Cuál es la mejor alternativa viable de aprovechamiento de los lodos residuales de la PITARNL para contribuir a cerrar el CUA?
3. ¿Cuáles son las posibles maneras de aprovechar los lodos residuales de la PITARNL disminuyendo las emisiones de GEI?
4. ¿En qué cantidad podría mejorarse la eficiencia actual de la PITARNL con el aprovechamiento de los lodos residuales?

³ Para lograr ese gasto energético, la PTAR implementó tecnología.

1.4.Objetivos

General

Identificar alternativas viables de aprovechamiento de los lodos residuales para la PITARNL, que reduzcan las emisiones de GEI, mejoren la eficiencia de la PITARNL y contribuyan a cerrar el CUA de Nuevo Laredo, Tam.

Específicos

1. Analizar el manejo actual de los lodos residuales de la PITARNL, para detectar áreas de oportunidad.
2. Identificar las opciones de aprovechamiento que permiten cerrar el CUA en Nuevo Laredo, Tam., referente a la PITARNL.
3. Determinar una forma de aprovechamiento viable de los lodos residuales de la PITARNL que disminuyan las emisiones de GEI.
4. Determinar la eficiencia actual de la PITARNL y comparar su mejora con la alternativa propuesta de aprovechamiento de los lodos residuales.

1.5.Hipótesis

General

El aprovechamiento de los lodos residuales de la PITARNL para la producción de biogás, es una opción para la sostenibilidad que permitirá disminuir las emisiones de GEI, mejorar la eficiencia de la PITARNL y contribuir al cierre del CUA de Nuevo Laredo, Tamaulipas.

Secundarias

1. El actual manejo de los lodos residuales de la PITARNL, es insostenible ya que se considera a los lodos como desechos, a pesar que cumplen con la normativa mexicana vigente.
2. Para cerrar el CUA referente a la PITARNL existen varias alternativas, sin embargo la producción de biogás para la generación de energía eléctrica es una alternativa viable dada la eficiencia de la planta y sus requerimientos energéticos.

3. El aprovechamiento de los lodos mediante la producción de biogás para generar energía eléctrica, disminuye las emisiones de GEI, ya que evita la descomposición de los lodos residuales al aire libre y la quema de hidrocarburos para la generación de energía.
4. El uso de la generación de la energía eléctrica generada a partir del biogás, disminuirá la importación de energía al proceso de tratamiento de aguas residuales, el cual forma parte del CUA de Nuevo Laredo, Tam.

1.6. Metodología

La unidad de análisis de este estudio es la PITARNL, considerando para el análisis el proceso desde que el agua cruda llega a la planta, hasta la reincorporación a otros ciclos productivos. El desarrollo de la metodología incluyó las siguientes actividades:

1. Analizar el actual Manejo de Lodos de la PITAR Nuevo Laredo.
 - i. Visita a la PITARNL.
 - ii. Revisión de los manuales de operación para el manejo de lodos residuales.
 - iii. Entrevistar a los responsables del manejo de la PITARNL, al Gerente de Saneamiento de la Comapa Nuevo Laredo, Tam., y al titular de la CILA en Nuevo Laredo, Tam. ([Anexo 1](#), guía de temas).
 - iv. Comparar el manejo de lodos de la PITAR Nuevo Laredo con los criterios establecidos en el Manual de Evaluación de Plantas de tratamiento de aguas residuales (González, 2011) en el capítulo de tren de lodos, especial para la variante de zanjas de oxidación de los lodos activados. ([Anexo 2](#), criterios). Solamente se analiza el tren de lodos, porque es en este proceso donde se propondría los cambios en la PITARNL.
 - v. Detectar áreas de oportunidad para la mejora del manejo de lodos de la PITARNL.
2. Desarrollar la evaluación de la eficiencia de la PITARNL.
 - i. Recopilar la información necesaria para la evaluación.
 - ii. Aplicar la evaluación energética para el escenario cero, con el manejo actual de la PITARNL, (Se muestran las formulas en el [Anexo 3](#)).

- iii. Aplicar la evaluación energética para el escenario uno, aprovechar los lodos residuales para la generación de energía.
3. Cuantificar las emisiones de GEI, por el saneamiento en la PITARNL.
 - i. Recopilar la información necesaria para la cuantificación de GEI.
 - ii. Cuantificar las emisiones de GEI con el manejo actual de los lodos residuales escenario cero. ([Anexo 4](#), ecuaciones e información necesarias)
 - iii. Estimar las emisiones de GEI con el aprovechamiento de los lodos residuales para la generación de energía escenario uno.
 4. Definir teóricamente cómo la forma de aprovechamiento cierra el CUA, en Nuevo Laredo, Tam.
 - i. Comparar la eficiencia energética y la reducción de GEI que permiten el aprovechamiento de los lodos residuales ([Anexo 5](#)).
 - ii. Establecer cómo el aprovechamiento de los lodos residuales cierra el CUA, dadas las condiciones de Nuevo Laredo, Tam.

Un primer paso en este trabajo fue conocer la visión de las instituciones que tienen a su cargo la PITARNL en particular aspectos sobre la eficiencia de la planta en el aspecto energético, las emisiones de los gases de efecto invernadero y el manejo de lodos. La visión de las instituciones que rigen a la PITARNL es importante, puesto que ésta empujará o frenará los cambios para el aprovechamiento de los lodos. En este trabajo se realizaron entrevistas a las personas involucradas en el manejo de la PITARNL, con el propósito de conocer la percepción que tienen acerca de la eficiencia de la planta, identificar propuestas que se hayan planteado para aprovechar los lodos, así como posturas y opiniones sobre la posibilidad de aprovechamiento de los lodos para generar energía. Otra parte importante de las entrevistas se enfocó a definir como conciben los entrevistados el concepto de sostenibilidad. La guía para las entrevistas se reporta en el [Anexo 1](#).

La PITARNL se considera una planta eficiente debido a que cumple con los parámetros obligatorios por la normatividad vigente. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), propone una metodología para la evaluación de plantas de tratamiento con el fin de determinar los procesos con áreas de oportunidad y proponer posibles mejoras. La principal área de

evaluación es el diseño, operación y mantenimiento, aunque también se toma en cuenta la administración (González, 2011). La PITARNL cumple con los parámetros referentes al efluente y lodos residuales, según la aplicación de metodología propuesta por el IMTA. Sin embargo en cuanto al manejo de lodos, en este trabajo se realizó la evaluación de este proceso. La evaluación se explica en el [Anexo 2](#).

Para contabilizar las emisiones de GEI y determinar la eficiencia energética se optó por la aplicación de dos metodologías diferentes. Para determinar la eficiencia de la planta se eligió utilizar la metodología descrita en MetCalf & Eddy (MetCalf & Eddy, et al., 2013). Mientras que para la evaluación de las emisiones de GEI, se usará la metodología propuesta por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), para proyectos de mecanismos de desarrollo limpio (MDL) en plantas de tratamiento de aguas residuales. Se realizó la comparación entre el aprovechamiento de los lodos residuales y el manejo actual de lodos residuales.

Aunque en temas de aprovechamiento de residuos y bioenergía, la metodología más usada y recomendada en la literatura es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (Centro Mario Molina, 2012; Noyola, et al., 2013) consistente en cuantificar los impactos ambientales asociados a la materia y la energía; es decir desde la materia prima hasta el manejo de los residuos (Corominas, et al., 2013; Aranda, et al., 2006); sin embargo, se consideró que dicha metodología no es pertinente para el enfoque conceptual del trabajo, basado en el CUA. Este estudio se enfoca principalmente en la eficiencia de planta desde el aspecto energético y la reducción de las emisiones de GEI relacionados al proceso de saneamiento dentro de la PITARNL. Por lo tanto, los impactos ambientales y el gasto de energía que son de interés para el trabajo se limitan exclusivamente a la planta. Aunque el trabajo se enmarca en una perspectiva teórica del CUA, no es objeto del estudio analizar todos los impactos ambientales ni las interacciones materia-energía que se dan en el CUA. La idea es medir la contribución que el aprovechamiento de los lodos puede hacer para mejorar las variables mencionadas. De esa forma el ACV abarcaría más variables que no es apropiado para este estudio.

La metodología propuesta para determinar la eficiencia de la planta se adaptó de la metodología diseñada para plantas en los Estados Unidos y toma en cuenta los criterios que señala la EPA. La metodología contempla parámetros de diseño, operación, así como de consumo energético. Un aspecto metodológico importante es que en su mayoría las unidades en la que está planteada, son

unidades del sistema inglés; mientras que el diseño y las unidades de la PITARNL son del sistema internacional. La conversión de unidades dará un ligero error, que no se considera relevante. Se considera que esta metodología es apropiada para la PITARNL dado que es supervisada por la CILA y sobre todo por los parámetros que debe cumplir con la calidad del agua tiene un funcionamiento similar a las plantas de Estados Unidos. Los cálculos se describen en el [Anexo 3](#).

Se utilizó la metodología del BID para contabilizar emisiones de GEI, debido a que está desarrollada especialmente para PTAR's. El enfoque de esta metodología consiste en contabilizar las emisiones de GEI con base en los criterios de manejo de la planta, el cual se considera como proyecto base y estima la disminución de las emisiones con la implementación de proyectos MDL. La finalidad de esta metodología es explorar la posibilidad de generar bonos de carbono (Nolasco, 2010). La mayoría de las mejoras que proponen los proyectos MDL son para el manejo de residuos, puesto que la técnica de lodos activados es uno de los procesos más utilizado en el mundo para el saneamiento del agua (Noyola, et al., 2013, p. 18); a pesar de que genera una gran cantidad de residuos. La metodología se explica detalladamente en el [Anexo 4](#).

En las conclusiones de este trabajo se presentan recomendaciones y propuestas para mejorar el manejo de lodos residuales de la PITARNL. Así como una explicación de la forma en que el aprovechamiento de los lodos residuales de la PITARNL contribuye a la sostenibilidad del CUA.



Capítulo II. Ciclo Urbano del Agua, sostenibilidad e interacciones agua y energía.

2.1 Ciclo Urbano del Agua

El ciclo urbano del agua (CUA) es un concepto que se ha desarrollado a partir del concepto de ciclo hidrológico natural del agua (CH). Se ha propuesto esta conceptualización por la necesidad de analizar las relaciones entre las demandas de las ciudades y el agua. Es importante también investigar cómo el desarrollo del uso urbano del agua afecta al ciclo hidrológico natural, con la finalidad de disminuir esas afectaciones para alcanzar la sostenibilidad⁴. Sin embargo para conceptualizar el CUA es necesario definir primero algunos conceptos previos, como ecosistema y por supuesto también el ciclo hidrológico. Para este trabajo se ha comenzado con la definición de ecosistema, ya que se ve a las ciudades como el ecosistema donde se lleva a cabo el CUA. Luego se hace un acotamiento del ciclo hidrológico del agua para ubicar el concepto de ciclo urbano del agua.

Un ecosistema puede ser definido en varias formas muy generalizadas, ciertamente es complejo establecer los componentes tanto como los límites o fronteras de los ecosistemas, por ejemplo los biólogos lo definen como: “El conjunto de poblaciones de diferentes especies que cohabitan en un sitio, que interactúan entre sí y con el ambiente físico y químico en el que se desarrollan”. (Semarnat, 2007, p. 16). Esta definición es básica, enmarca la generalidad de los ecosistemas, menciona la relación entre las diferentes especies y con su ambiente. Sin embargo no desarrolla una visión acerca de las complejas sinergias que existen dentro de los propios ecosistemas. Por su parte Davis y Masten van más allá, por lo que escriben una definición más amplia:

Lo conforman comunidades de organismos vivos que interactúan unos con otros y con su entorno físico, incluido en éste la luz solar, la lluvia y los nutrientes del suelo. Los seres vivos de un ecosistema tienden a interactuar en mucho grado que los organismos de dos o más ecosistemas [...] Los ecosistemas pueden definirse adicionalmente como sistemas en los cuales fluye la materia (Davis & Masten, 2005, p. 136)

En esta descripción se tocan puntos importantes como la interacción con especies de otros ecosistemas. Esta cuestión es importante ya que muestra que los ecosistemas son dinámicos y

⁴ Se discute en otro apartado este concepto.

crean correlaciones con otros ecosistemas. Las relaciones son indispensables pues gracias a ellas se da el flujo de materia. Otro aspecto relevante es la intervención de la luz solar, el agua y otros elementos. La luz solar y agua son indispensables y determinante en todos los ecosistemas, la relación que hay entre estos dos elementos es estrecha, y marcan la pauta para desencadenar todos los procesos e intercambios dentro y entre los ecosistemas. Por su lado Vilee (2001) hace mención de cómo deben ser esos procesos y delimita los ecosistemas de la siguiente forma:

Una unidad natural de partes vivientes o inertes estables en el cual el intercambio de sustancias entre las plantas vivas e inertes es de tipo circular. Un ecosistema puede ser tan grande como el océano o un bosque, o uno de los ciclos de los elementos, o tan pequeño como un acuario [...] Para calificarla de un ecosistema, la unidad ha de ser un sistema estable, donde el recambio de materiales sigue en camino circular. (Vilee, 2001, p. 142).

En esta definición vemos la importancia del intercambio entre las especies, y que los procesos que conllevan a dichos intercambios son de tipo circular. No se generan desechos, pues los ecosistemas están en equilibrio o estabilidad; en otras palabras, lo que aparentemente son residuos es materia prima para otros. Existen varios ciclos que interactúan con los ecosistemas, como el del carbono, nitrógeno o fósforo, fundamentales para el desarrollo de las especies (Manahan, 2007). Por ejemplo el CH es un proceso circulante importante en los ecosistemas, pues el agua es un medio para que los intercambios entre estos y sus especies. Por lo queda claro que de forma natural los procesos ecosistémicos son cíclicos. De esta forma se garantiza el mantenimiento de los ecosistemas a lo largo del tiempo con la reincorporación de los recursos.

Ahora bien el CH es un proceso circulante importante en los ecosistemas pues interactúa con otros ciclos que se llevan a cabo. Este ciclo ayuda a controlar la contaminación, mantiene los ecosistemas sin alteraciones y permite el desarrollo sostenible de estos (Baron, et al., 2003). Como Langbein y Hoyt (1959) lo mencionan, el CH es uno de los grandes planes de la naturaleza; pues reconocen su importancia para los ecosistemas. Aunque existen una gran cantidad de intentos de conceptualizar al CH, típicamente se precisa como:

Un modelo conceptual que describe el almacenamiento y la circulación de agua entre la biosfera, la atmósfera, la litosfera y la hidrosfera. El agua puede ser almacenada en la atmósfera, los océanos, lagos, ríos, arroyos, suelos, glaciares, campos de nieve y acuíferos subterráneos. La circulación del agua entre estos medios de almacenamiento es causada por procesos como la evapotranspiración, condensación, precipitación, infiltración, percolación, deshielo y la

escorrentía... (Marsalek, et al., 2007) Traducción.

Son varios los procesos necesarios que abarca el CH, la mayoría de ellos requieren energía natural para realizarse. La evaporación, evotranspiración y el deshielo toman directamente la energía de la radiación de la luz solar. Sin embargo la energía proveniente del sol afecta también la condensación y la precipitación. Por su parte factores como la presión atmosférica y la gravedad afectan la infiltración o escorrentía. Es preciso comentar que influyen más variables de forma compleja. Queda claro que el CH es un sistema cíclico complejo que requiere de energía natural para llevarse a cabo. El agua y las consecuencias de su ciclo son indispensables para cualquier ecosistema, ya que junto con la energía son constantes indispensables para el desarrollo de cualquier hábitat (ONU, 2014).

A partir de estos elementos puede proponerse definir a las ciudades como ecosistemas. Las concentraciones poblacionales son ecosistemas, ya que hay interacciones entre los organismos vivos, el entorno físico y otros ecosistemas. Dentro de las ciudades, existen un gran intercambio de materiales y fuertes sinergias con otros ecosistemas. No obstante las similitudes de la definición de ecosistemas y una ciudad, existe una particularidad que no se cumple, la mayoría de los procesos que se llevan en ella no son de forma cíclica. Es decir las cadenas de producción tienen un principio y un fin, por lo que generan desechos o bien son ciclos incompletos. Lo que quiere decir que los residuos se acumulan generando contaminación.

Como en todos los ecosistemas, el ciclo del agua en las ciudades es de suma importancia. Surge entonces la necesidad de conceptualizar al ciclo urbano del agua (CUA). Por ejemplo Marsalek y otros autores en una publicación para la Organización de las Naciones Unidas para la Educación y la Cultura UNESCO, mencionan que el CH es modificado por los efectos de la urbanización y su infraestructura civil, sin embargo el principal efecto viene con el suministro de agua y el manejo de las aguas residuales para satisfacer las necesidades de las ciudades (Marsalek, et al., 2007).

El ciclo hidrológico se vuelve más compleja en las zonas urbanas, debido a muchas influencias e intervenciones (McPherson, 1973; McPherson y Schneider, 1974) antropogénicas; el ciclo hidrológico "urbano" que resulta se llama entonces el ciclo urbano del agua... (Marsalek, et al., 2007) Traducción.

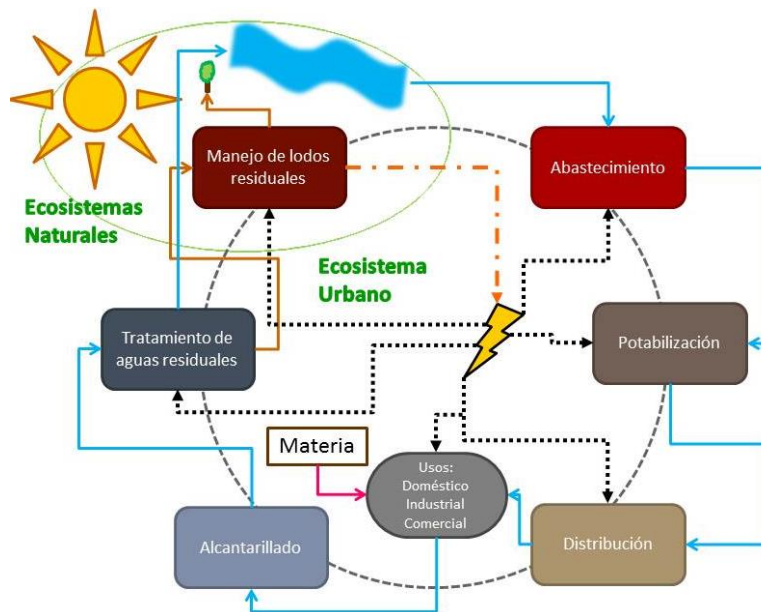
El CUA es un sistema importante, dentro del dinamismo de los ecosistemas urbanos en el cual interactúan los procesos productivos, diversos actores, servicios eco-sistémicos y públicos, infraestructura técnica e institucional, referente a la gestión del recurso (Flores, 2008). Por otro lado existen otros factores más allá de las partes visibles, que afectan el CUA. La dependencia del uso de energía, muchas veces no es perceptible pero es una constante entre el CUA y el CH. Para cumplir con los procesos del CUA al igual que CH la energía es vital; sin embargo la energía para el CUA requiere de procesos de transformación, típicamente eléctrica, y ésta es generada en muchos casos utilizando a su vez agua como fuente. Por ejemplo, el 83% de la generación de energía eléctrica en México en el 2011 fue a base de termoeléctricas, la generación de energía que más emite GEI por la quema de hidrocarburos. A su vez los GEI afectan en gran medida el CH y en consecuencia al CUA.

Otro de los factores intangibles es la estructura social; un factor que sin duda afecta al CUA principalmente por medio de la normativa y las instituciones pertinentes, ya sean formales o informales (Bahri, 2011; Flores, 2008). Esto es relevante ya que es el principal factor para la gestión del CUA. En este punto es importante mencionar que la mala gestión del CUA no solo afecta la posibilidad de cubrir las necesidades de las ciudades sino también la de otros ecosistemas, por las múltiples variables con que se relacionan. En el mediano plazo los impactos en los ecosistemas naturales afectan nuevamente a los ecosistemas urbanos.

El ciclo urbano del agua para poder cumplir con las necesidades de los ecosistemas urbanos, desarrolla las siguientes actividades (gráfica 1):

- a) **El abastecimiento**, se basa en la extracción del agua de los ecosistemas para transportarla a las ciudades. Las fuentes de agua típicamente son de agua superficial o subterráneas (aunque existen otras), en ambos casos se requiere de maquinaria como bombas de alto consumo energético. Usualmente se considera sólo la entrada de agua, no obstante también existe entrada de energía. El agua es transportada hasta las plantas potabilizadoras.
- b) **Potabilización**, en esta etapa se le retiran contaminantes al agua para que sea apta para el uso humano. Existen muchos procesos para lograr la meta, según la calidad del agua que entra, es el proceso que se elige para la potabilización. Cualquier proceso demanda energía eléctrica, por lo que hay una entrada necesaria de energía, que cambia en cantidad

dependiendo del tratamiento.



Gráfica 1. Ciclo urbano del agua. Elaboración propia

- c) **Distribución** o abastecimiento de agua potable, esta etapa abarca desde la salida de las potabilizadoras hasta la entrega a diferentes usuarios dentro de la ciudad. Para llevar a cabo esta fase es necesario el uso de bombas eléctricas, las cuales demandan energía eléctrica. En este punto es preciso mencionar que en algunas ciudades puede darse el caso que la distribución sea por gravedad, por lo que el uso de energía disminuya. Por lo que es preciso perfilar cada CUA para ciudad.
- d) **Los tipos de uso el agua**, en un ecosistema urbano existen tres principales usos del agua, el industrial, comercial y principalmente el doméstico. El desarrollo de los diferentes usos depende de la estructura económica de la ciudad. Los distintos tipos de uso definen distintos procesos de entrada de materiales y energía. Es importante mencionar que el manejo del agua por los usuarios requiere uso de mucha energía adicional, que usualmente no se considera dentro del CUA, pues los organismos operadores no asumen

la responsabilidad de ese flujo de energía.

- e) **Alcantarillado**, este proceso consiste en trasladar el agua después de los distintos usos a PTAR's que generalmente están lejos de los centros urbanos, para disminuir los riesgos sanitarios. Generalmente el desarrollo de este proceso no requiere entrada de energía, pues se lleva a cabo por medio de gravedad. Es importante mencionar que la caracterización de las aguas residuales está basada en el uso que le dio y consecuentemente el tratamiento dependerá de la calidad de las aguas residuales.
- f) **Saneamiento**, es la fase en la cual se retiran los materiales adquiridos y/o arrastrado durante su uso. Los procesos para tratar el agua son variados, dependiendo como ya se mencionó del uso y de la normatividad para su descarga o reúso, pero en todos los casos es necesaria la entrada de energía. Una parte importante es que la salida del agua de esta fase es para los ecosistemas⁵, es decir de donde se tomó para el abastecimiento. En esta fase existe otra salida, los materiales concentrados que adquiere el agua durante su uso. El manejo de lodos que contemple la reincorporación a los ecosistemas de manera productiva, forma parte de esta fase.

Es de suma importancia mencionar que la caracterización específica de cada CUA, varía según las fuentes de abastecimiento, necesidades, estructura económica, hábitos de consumo y ubicación de cada ciudad. Por ejemplo podría darse el caso que en alguna ciudad la distribución se dé por gravedad por lo que no es necesaria la entrada de energía en esa actividad. Los usos del agua son otro aspecto que varía según la estructura económica de cada ciudad.

Las interacciones del CUA, los usos dentro de las ciudades y otros ecosistemas naturales, están acotadas por la legislación y las instituciones referentes a los estos. El saneamiento del agua también puede variar según las condiciones geográficas y las normativas impuestas. Como puede deducirse la caracterización puntual de cada CUA es importante, ya que el contexto en el que se desarrolla determinará mejoras a los procesos. Es relevante mencionar también que en todos los procesos hay pérdidas de agua, que repercute en el CUA, por ejemplo en el consumo energético. Como se aprecia de los párrafos anteriores las complejidades del ciclo urbano del agua son tales, que se ha propuesto sectorizarlas (Bahri, 2011), aunque sin perder de vista que las decisiones tomadas tienen repercusiones en todo el ciclo. Esto es de suma importancia ya que cada vez los

⁵ No necesariamente se regresa el agua al mismo ecosistema.

impactos del CUA son más significativos, pues día a día personas se suman a los ecosistemas urbanos (Barrios, 2012). El aumento de población repercute directamente en los volúmenes de agua que se gestionan dentro del CUA, tanto para su potabilización, tratamiento, así como los lodos generados por el saneamiento del agua.

La idea de sectorizar el CUA es pertinente, pues permite focalizar las áreas de oportunidad. Por ejemplo en teoría si se plantea cerrar el CUA con la incorporación de sus salidas a ciclos productivos para tener procesos circulantes y cumplir con la definición de ecosistemas, puede esperarse una mejor gestión del CUA en términos de disminuir las afectaciones a otros ecosistemas. Sin embargo uno de los aspectos específicos de reincorporación de materiales y energía que no se ha analizado con suficiencia es la reincorporación de los lodos residuales a ciclos productivos de los ecosistemas. La importancia de visualizar a las PTAR's como fuentes de recursos, como un mecanismo para cerrar el CUA es fundamental no solo para la gestión del CUA sino del CH.

Definir en qué medida puede cerrarse el CUA dependerá de la definición de la que se parte. Se podría decir que cerrar el CUA completamente comprende la reincorporación del efluente y los materiales al cien por ciento; es decir que toda el agua y los materiales que entra al CUA sean regresados a los ecosistemas y ciclos productivos, sin embargo esto parece poco viable en la práctica. En México el promedio nacional de alcantarillado en 2010 fue 96% (CONAGUA, 2011), así mismo el tratamiento de aguas residuales fue de solo 42% en 2009 (CONAGUA, 2010). Es decir primero se tendría que asegurar el tratamiento del 100% de las aguas residuales, así como disminuir las pérdidas físicas del agua. Por eso la importancia de caracterizar cada caso es importante, ya que habrá casos en los que sea posible la reincorporación de los productos generados en las PTAR; otros casos en los que primero hay que garantizar un buen funcionamiento de las PTAR's.

En resumen, se define el CUA como las variaciones del CH a causa de las interacciones con un ecosistema urbano. Estas interacciones están principalmente relacionadas con el abastecimiento y saneamiento para el uso humano. Los procesos para llevar a cabo el CUA requieren de entradas de energía eléctrica, agua y materiales así como salidas de agua y materiales. Otro factor significativo intangible de los CUA es la infraestructura legal e institucional que gestiona el CUA, y que es el principal factor de su buena gestión. Un aspecto importante del CUA es cerrarlo

por medio de la reincorporación del 100% las salidas del saneamiento a procesos productivos de los ecosistemas, para asegurar la circulación de los materiales indispensables para los ecosistemas.

2.2 Sostenibilidad

Un concepto importante en este trabajo es el de sostenibilidad, desde el surgimiento del concepto planteado en 1987, hasta el día de hoy, dicho concepto registra opiniones encontradas. Sin embargo lo que es un hecho es que la sostenibilidad como lo plantean Dixon y Fallon (1989) es un tema de moda, sobre todo entre los políticos e instituciones. La sustentabilidad según la *World Commission on Environment and Development* en 1987, consiste en: Satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades.

Una de las críticas para este concepto es que es imposible de lograr por muchos aspectos, algunos que probablemente aún no se alcancen a percibir. Una de las principales observaciones es que siempre habrá afectaciones en por lo menos algún sector en algún determinado tiempo, por lo que siempre la satisfacción de necesidades presentes afectará generaciones futuras. Por otro lado es importante tener en cuenta lo que mencionan Dixon y Fallon:

La palabra sustentar viene del latín *sustenerere*, que significa sostener o mantener en alto. En el contexto de los recursos y del medio ambiente sustentar significa entonces -literalmente- mantener o prolongar el uso productivo de los recursos, y la integridad de la base de recursos. Esto implica, entre otras cosas, que existen restricciones físicas y de otra índole al uso productivo de los recursos (Dixon & Fallon, 1989, p. 50).

Este acotamiento que hacen Dixon y Fallon, es importante ya que dejan claro que siempre hay una limitante que habrá de tomarse en cuenta para futuras conceptualizaciones, pero sobre todo en propuestas para lograr la sostenibilidad. Han sido muchos los esfuerzos por definir mejor el concepto de la sostenibilidad para que sea algo que se pueda alcanzar y medir. Por ejemplo, como lo menciona Castro (2009) un ecosistema sostenible es aquel que mantiene la integridad del sistema a lo largo del tiempo. A pesar de que esta definición parece más aterrizada, es preciso definir las fronteras del tiempo que propone con “a lo largo del tiempo”, y hasta donde se abarca la

integridad que menciona, ya que para algunos la contemplación de la integralidad se termina en lo referente al desarrollo antropocéntrico, pero para otros las actividades ecosistémicas deben ser más importantes.

La importancia de dejar en claro la integridad se podría explicar con los modelos de Turner (1993), este menciona que existen cuatro grados de sustentabilidad. El primero es sustentabilidad muy fuerte, que contempla la naturaleza como prioridad; el segundo es sustentabilidad fuerte que acepta relaciones antropológicas con la naturaleza, pero sigue priorizando los ecosistemas naturales; el grado débil que acepta relaciones pero antepone lo antropológico; y finalmente la sustentabilidad muy débil en la cual la visión principal es de desarrollo económico. Bajo estos modelos los ecosistemas urbanos, jamás podrán aspirar a una visión de ecosistema muy fuerte ni fuerte, ya que siempre se antepone lo antropocéntrico, además el impacto ambiental que tienen parece irremediable; de ese modo, se dice que la sustentabilidad de un ecosistema urbano es débil, pues las actividades antropocéntricas siempre serán una prioridad.

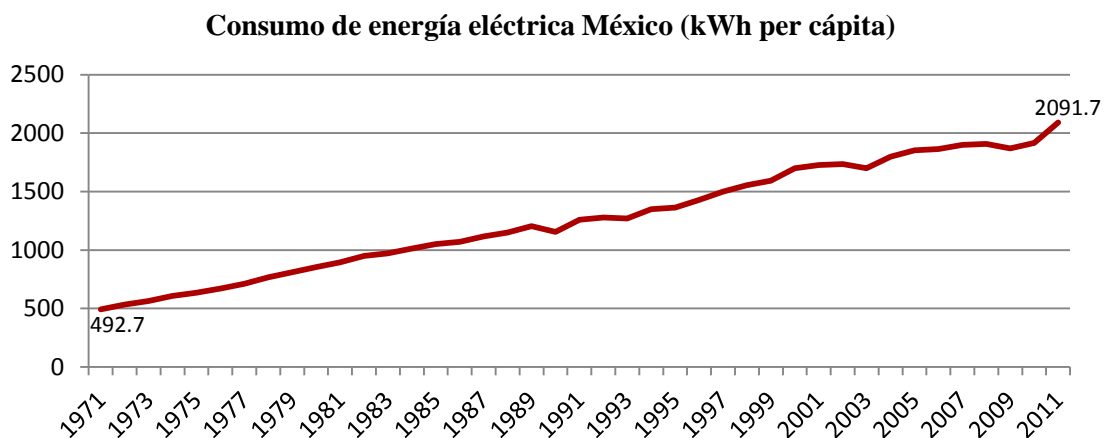
En este trabajo se define la sostenibilidad como el uso de recursos locales, para disminuir los impactos ambientales y sus costos, tratando de mitigar los impactos ambientales potenciales en un lapso mediano de tiempo, de forma que sea medible y viable en las condiciones específicas del CUA, dado que las necesidades y condiciones del futuro no son confiables y altamente variables. En ese sentido, se propone que para que las futuras generaciones tengan la posibilidad de satisfacer sus necesidades, es indispensable imitar los modelos de producción cíclicos de la naturaleza, disminuyendo los desechos, mediante su aprovechamiento como materia prima para otros procesos, de esa forma se contribuye a que la materia siga en reincorporación y disminuya el riesgo de contaminación.

La reincorporación de la materia además de reducir desechos, pretende reducir la importación de materiales y energía. La importación de materia se traduce en más agua, en más energía, es decir más contaminación, para el propio ecosistema y otros. Con el aprovechamiento de los recursos locales, se logra en cierta medida las metas mencionadas. Se disminuyen emisiones de GEI por el uso vehículos, pues cualquier tipo de traslado implican emisiones de GEI. En este trabajo se propone que los lodos residuales de las PTAR's deberían ser considerados un recurso por su alto contenido orgánico y buscar la manera de aprovecharse en la zona en la que producen. Los recursos que se aprovechan contribuyen a una gestión sostenible, pues contribuirá a cerrar el

CUA asegurando procesos cíclicos con la reincorporación de los materiales y disminuyendo GEI. En este caso, el aprovechamiento de lodos residuales de la PITARNL permitiría reducir la salida de materiales y la entrada de energía.

2.3 Agua-Energía

Los panoramas energéticos a nivel global, tienen diferentes perspectivas en cuanto a las fuentes de energía que se habrán de utilizar para satisfacer los cada vez más altos consumos energéticos. La mayoría de estas perspectivas estipulan que los hidrocarburos seguirán siendo el principal combustible. Sin embargo también se menciona la urgencia de aprovechar las fuentes alternas de energía como la solar o eólica, si las condiciones lo permiten (García, 2008). O bien la posibilidad del aprovechamiento de la biomasa, en especial el aprovechamiento de residuos orgánicos; ya que los cultivos extensivos para la generación de energía aumentan la demanda de agua y ponen en riesgo la biodiversidad de las especies.



Gráfica 2. Evolución del consumo de energía per cápita en México 1971-2011 (Grupo del Banco Mundial, 2014)

Otra opción al respecto es que el aprovechamiento de las fuentes alternas para la generación de

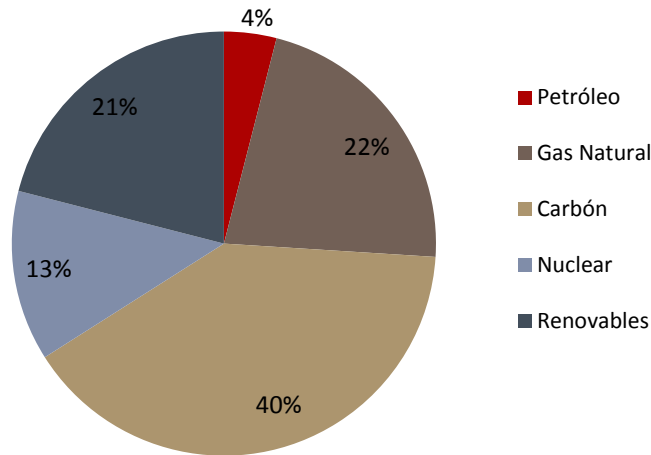
energía es aún un acontecimiento que aunque ha crecido, no es suficiente (SENER, 2012). Sin embargo es importante hacer notar se ha puesto poca atención en el control de la demanda de energía, es decir reducir el consumo. Mientras que los costos del procesamiento del petróleo aumentan principalmente por su dificultad en la extracción (García, 2008). Por ejemplo en la gráfica 2 se muestra como ha aumentado el consumo energético per cápita en México en casi 400% de 1971 a 2011 (Grupo del Banco Mundial, 2014). Aunado a esto la variabilidad climática continua posicionándose como un tema de suma importancia mundial, en ese sentido la fortaleza de las fuentes alternas de energía obtiene puntos a su favor.

Las repercusiones de la creciente demanda energética preocupan de forma alarmante. Como se ha mencionado, la energía eléctrica es necesaria para el desarrollo del CUA. En 2010 el 26% de la generación de energía en el mundo fue a partir de hidrocarburos, 40% en base al carbón, es decir termoeléctricas, el otro 13% era a base de energía nuclear (Sener, 2013) (gráfica 3). Lo relevante de esto es que, el vector energético de las termoeléctricas y nucleoeeléctricas, es el agua. Ahora bien el 21% de la generación de energía en ese mismo año fue por medio de fuentes renovables, de estas el 70% son hidroeléctricas (gráfica 4). Por su parte en las hidroeléctricas la fuente energética es el agua, ya que aprovechan la energía potencial de los saltos de agua, a lo largo de su trayecto.

Se aprecia con facilidad la sinergia que existe entre el agua y energía. A mayor demanda de energía, mayor demanda de agua. Cuanta más demanda de energía aumenta la demanda de agua. Por otro lado a mayor generación de energía aumentan las emisiones de GEI. Por ejemplo México en 2008 obtuvo un factor de emisión de $0.466^{tonCO_2}/MW$,⁶ (Alonso, et al., 2011), un factor bueno en comparación con otros países (tabla 1) y por debajo del promedio. Sin embargo las interacciones que se analizan entre los ecosistemas revelan una necesidad de bajar el factor de emisiones. Ya que entre otras existen afectaciones al CH y las reacciones que desencadenan afectan al CUA.

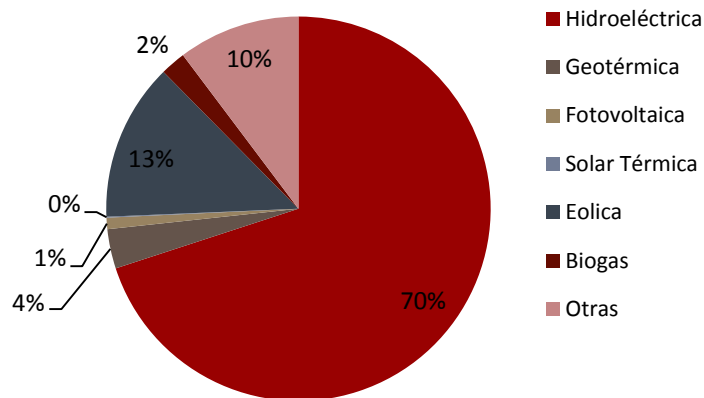
⁶ Toneladas equivalentes de Dióxido de Carbono por Mega Watt.

Fuentes de energía en el mundo 2010



Gráfica 3. Fuentes de energía en el mundo. Información (Sener, 2013)

Fuentes renovables 2010 en países de la OCDE



Gráfica 4. Fuentes renovables 2010. (Sener, 2013)

Ahora bien el cambio climático o alta variabilidad climática al igual que el concepto de sostenibilidad ha sido muy discutido. No obstante la mayoría de la comunidad científica y civil

ha aceptado el concepto que Naciones Unidas en 1992 definió como: “Se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. (Naciones Unidas, 1992, p. 3).

País o Red	Factor de Emisión tonCO ₂ /MW
Estados Unidos	0.559
China (Red Este)	0.9046
India	0.81
Vietnam	0.705
Reino Unido	0.43
España	0.428
Italia (Sicilia)	0.47
Ucrania	0.807
Brasil (red interconectado sur-sudeste-medio oeste)	0.2826
Ecuador	0.56053
Argentina	0.425
Uruguay	0.575
Colombia	0.4392
El Salvador	0.717
Chile	0.408
Perú	0.47207
Nicaragua	0.7127
Bolivia	0.581
Panamá	0.5593
Costa Rica	0.48835
Australia	0.751
Nueva Zelanda	0.161
Filipinas	0.494
Etiopía	0.00591
Ghana	0.57582
Uganda	0.5767
Promedio	0.53456846

Tabla 1. Factor de emisiones de GEI toneladas de Dióxido de Carbono por Mega-Watt (Nolasco, 2010, p. 85)

La relevancia de la variabilidad climática sobresale puesto que el CH es uno de los procesos más afectados. Por consecuencia hay afectaciones también al CUA íntimamente relacionado con la energía eléctrica una de las principales causas de las emisiones de GEI. Uno de los grandes problemas para la sostenibilidad es la demanda creciente de energía; se estima que seguirá creciendo pues aún existen 768 millones de personas sin acceso a fuentes de agua, 2500 millones no tienen saneamiento y cerca de 1300 millones no tienen acceso a energía eléctrica (Lino, 2014); llevarles agua y energía aumentará la tensión entre estos factores. Se retoma entonces la idea de que el agua y la energía son indispensables para los ecosistemas. Este trabajo parte del planteamiento que el agua y en consecuencia a la energía son necesarias para tener una calidad de vida aceptable.

Pensar en soluciones universales para problemas complejos no es conveniente. Garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas urbanos, está en lograr procesos circulantes que se integren al contexto aprovechando los recursos locales. Cerrar el CUA en la etapa del saneamiento con la reincorporación de sus flujos de salida de las PTAR's es una necesidad que debe atenderse. Buscar que conjuntamente reduzcan las emisiones de GEI es un reto que de ser posible deberá realizarse para disminuir las afectaciones a los ecosistemas incluidos los urbanos. Con la finalidad de tener medios de recuperación de recursos para que no se comprometa el desarrollo de las generaciones futuras, dado que la energía y agua son indispensables (ONU, 2014).

Las posibilidades de reincorporar la materia de las salidas de las PTAR's son variadas, el efluente puede llegar nuevamente para usos como el riego o usos ecosistémicos, es decir reincorporarse al CH. Otra posibilidad es aprovechar el efluente para usos industriales que requieren poca calidad como torres de enfriamiento, o bien para regar parques y jardines de la ciudad. Para la reincorporación de los lodos existen varias posibilidades, las más comunes son utilizarlos como fertilizantes o aprovechar su potencial energético. Para ser utilizados como fertilizante, los lodos deben pasar por un proceso de composteo (Ramírez, s.f.). Este proceso consiste en una digestión anaerobia que libera GEI, por la respiración de las bacterias. Para el aprovechamiento energético existen varios métodos (Tabasová, et al., 2012). Uno de ellos es la digestión anaerobia, su principal característica es la ausencia de Oxígeno y la generación de biogás, que a su vez puede generar energía eléctrica.

Los lodos típicos de aguas residuales domésticas de las PTAR's son un buen recurso para la

generación de biogás ya que generalmente son altos en sólidos volátiles, indispensable para la generación de biogás: “Los lodos crudos contienen usualmente de 60 a 70 por ciento de sólidos volátiles, mientras que los lodos bien digeridos llegan a tener tan solo un 50 por ciento, lo que representa una disminución de alrededor del 50 por ciento[...].” (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, 2006, p. 119)

La generación de biogás para producir energía eléctrica a partir del aprovechamiento de los lodos residuales parece una opción viable, siempre y cuando se integre a un CUA específico, es decir que sea congruente con las actividades económicas que los rodean, a la normativa, incluso a la sociedad. Un punto importante es que el biogás aporta GEI que son considerados neutros al sistema, es decir que las emisiones que genera son necesarias para el ciclo tanto del agua como del carbono, que ya han estado antes activos en los ecosistemas. Si bien es cierto que lo ideal sería eliminar de las emisiones de GEI por generación de energía, pero por otra parte las fuentes alternas de energía son una opción que permiten disminuir las emisiones de GEI.

La importancia del aprovechamiento de los recursos locales para la utilización dentro del CUA es esencial. La energía eléctrica es indispensable para todos los procesos que conforman el CUA. Es cierto que las condiciones locales de los ecosistemas urbanos influyen el gasto energético en muchas maneras, sin embargo en el caso de las PTAR's el uso de la energía es indispensable para los propios procesos de saneamiento como en su uso en motores para la aireación del flujo de agua. Por lo que buscar aprovechar los lodos residuales es importante para lograr un CUA sostenible



Capítulo III. Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo, Tamaulipas.

3.1 Nuevo Laredo, Tamaulipas.

La ciudad de Nuevo Laredo está ubicada en el noreste mexicano, pertenece al estado de Tamaulipas, (gráfica 5 pág. 36). Nuevo Laredo es una ciudad fronteriza que cuenta con tres puentes internacionales carreteros, que llegan a la ciudad de Laredo Texas. Las ciudades de Nuevo Laredo, Tamaulipas y Laredo, Texas mantienen un fuerte vínculo económico y cultural. Nuevo Laredo cuenta con una extensión territorial de 1,202 km^2 de los cuales 122 son urbanos (INEGI, 2013). Nuevo Laredo tiene un clima seco, la temperatura media es 23°C, la temperatura promedio máxima es 37°C y la mínima es de 8°C; aunque ha registrado temperaturas de 40°C; su precipitación media anual varía de los 472 a 485 mm^3 (PARSONS, 2002; Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2011).



Gráfica 5. Ubicación geográfica de Nuevo Laredo, Tam. (EmbassyWorld.com Inc., 1998)

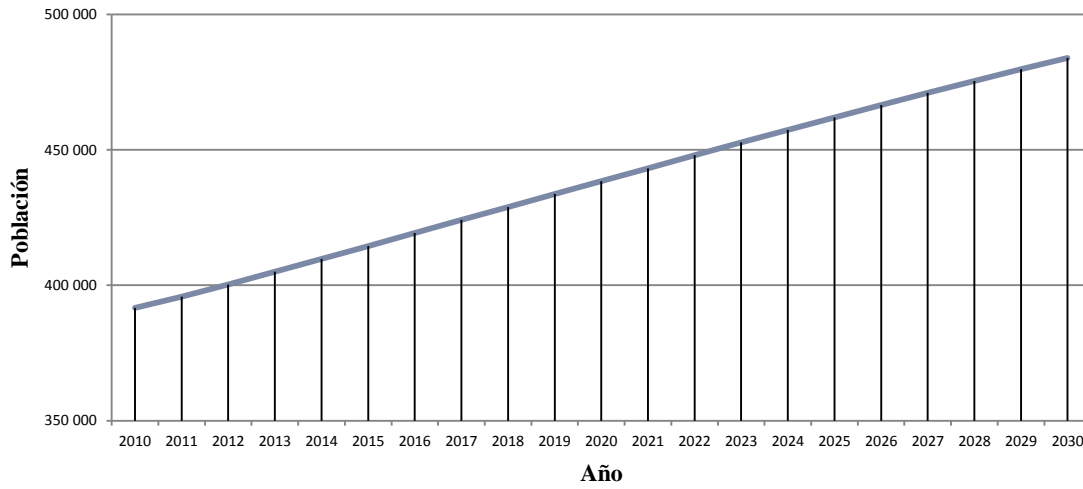
La ciudad de Nuevo Laredo fue fundada después del Tratado de Guadalupe Hidalgo de 1848, año en que lado Norte del Río Bravo dejó de ser mexicano. Los habitantes se trasladaron al lado sur del Río, ya que no estaban dispuestos a dejar sus tradiciones y costumbres (Ceballos, 1989). Sin embargo durante mucho tiempo los habitantes de Laredo Texas y Nuevo Laredo Tamaulipas tuvieron libre tránsito entre estas ciudades (PARSONS, 2002). Todavía hoy en día el intercambio entre estas dos ciudades es importante para la región, y uno de los principales motores económicos y demográficos.

La infraestructura económica de Nuevo Laredo está compuesta por actividades primarias, secundarias y terciarias con predominio de estas últimas. La agricultura apenas contabiliza 14 mil hectáreas sembradas que en su mayoría son de pasto para ganado; pocas en comparación con otras ciudades fronterizas de Tamaulipas; por ejemplo, existen 158 mil hectáreas sembradas en Matamoros o 83 mil en Reynosa (INEGI, 2013). Las actividades económicas de servicio representan la principal actividad, en Nuevo Laredo (INEGI, 2013). Lo anterior a consecuencia de que Nuevo Laredo es el principal puerto terrestre de la república mexicana (PARSONS, 2002). Su importancia para el comercio con los Estados Unidos hace que la población de Nuevo Laredo registre un crecimiento por arriba del promedio nacional en las últimas décadas.

La estructura económica de Nuevo Laredo atrae una fuerte migración de otras partes de la república. La estimación de la Comisión Nacional de Población Conapo para Nuevo Laredo se refleja en la gráfica 5. En la gráfica se observa un crecimiento lineal, con una tasa de crecimiento del 2010 al 2020 de 0.12 (Conapo, 2012). Esto debe ser tomado en cuenta por el municipio para garantizar los servicios públicos. Ya que según INEGI en el censo del 2010 Nuevo Laredo, Tam., tenía una población total de 384,033 habitantes (INEGI, 2013). Se contabilizaron 101,841 viviendas de las cuales 90,682 cuentan con servicio de agua, y que 90,777⁷ viviendas cuentan con servicio de drenaje; es decir un 89% de cobertura (INEGI, 2011).

⁷ Estos datos parecen inconsistentes, pues hay más casas que cuentan con servicio de drenaje que con servicio de agua potable.

Proyecciones de Población 2010-2030 Nuevo Laredo



Gráfica 6. Estimación del crecimiento poblacional en Nuevo Laredo. Información

3.2 La Comisión Municipal para el Agua Potable y Saneamiento del Municipio de Nuevo Laredo Tamaulipas.

La institución encargada de abastecer de servicios de agua potable y saneamiento a la ciudad de Nuevo Laredo, es la Comisión Municipal de Agua Potable y Saneamiento del Municipio de Nuevo Laredo, Tam. (Comapa). La Comapa tiene una cobertura del servicio de agua potable de 98%, mientras que en el servicio de alcantarillado reporta un 95%; en ambos servicios la Comapa supera la media nacional. Los datos que maneja la Comapa en cuanto a cobertura de los servicios difieren de los que reporta INEGI, por calidad de la información directa en este trabajo se reportan los datos proporcionados por la Comapa. Este organismo operador construyó en 1926 la primera planta de potabilización con capacidad de 100 l/s teniendo como única fuente de abastecimiento el agua superficial del Río Bravo. En 1951 aumentó la capacidad de potabilización a 300 l/s (Comapa Nuevo Laredo, 2012). En 1957 fue rediseñada a la configuración actual, para abastecer del servicio de agua potable. No obstante fue hasta 1988 que se creó un plan para el cumplimiento de todo el CUA, dicho plan culminó en el año 2000.

La necesidad de plantas tratadoras de aguas residuales en el municipio es evidente pues la Comapa descargaba 876 l/s de aguas residuales no tratadas al Río Bravo. El 28 de agosto de 1989 se firmó el Acta 279 de la CILA titulada “Medidas Conjuntas para Mejorar la Calidad de las Aguas del Río Bravo en Nuevo Laredo, Tamaulipas- Laredo, Texas”. En dicha acta quedaron establecidas las condiciones particulares de descarga, acordadas por ambas partes del CILA. Fue así como inició el Proyecto Internacional de Saneamiento Fronterizo de Nuevo Laredo con la construcción de 6 compones que incluyó rehabilitaciones y ampliaciones de la red de alcantarillado, colectores principales y una Planta de Tratamiento. De ese modo en Abril de 1996 se puso en marcha la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo, Tam. (Comapa Nuevo Laredo, 2012).

Plantas de Tratamiento de aguas residuales	Capacidad l/s	Tratamiento Real l/s	Equivalente % del agua tratada en Nuevo Laredo
PITARNL	1360	900	90.73
Norponiente	200	58	5.85
Valles de Anáhuac	33	26	2.62
Oradel	9	5	.50
Villas de Oradel	15	3	.30
TOTAL	1611	992	100

Tabla 2. Plantas de tratamiento de aguas residuales de Nuevo Laredo. Información proporcionada por la Comapa

Hoy en día la Comapa cuenta con dos plantas potabilizadoras y cinco Plantas de Tratamiento de Aguas residuales (CEAT, 2013) tabla 2, con el fin de cumplir con el saneamiento del CUA de Nuevo Laredo. De acuerdo con la información que recaba la CONAGUA, a diciembre de 2010 existían en el país 2,186 PTAR en operación formal, con una capacidad total instalada de 126.8 m^3/s , sin embargo solo se tratan 93.6 m^3/s , equivalente al 44.8% del total de aguas residuales. De todas las plantas dentro del inventario de CONAGUA tres se denominan plantas tratadoras de aguas residuales internacionales que fueron financiadas conjuntamente entre México-EUA,

ubicadas en Tijuana, Baja California, Nogales, Arizona y Nuevo Laredo, Tamaulipas, (CILA, 2012).

Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo Tamaulipas

El municipio de Nuevo Laredo cuenta únicamente con 644 unidades manufactureras, a diferencia de la también ciudad fronteriza en el estado de Chihuahua Cd. Juárez que cuenta con 2,315 unidades, son pocas. (INEGI, 2010). De estas 644 unidades manufactureras solamente 32 utilizan agua en sus procesos por lo que las aguas residuales generadas son principalmente de origen comercial y doméstico. Aunada a esto la Comapa exige el pretratamiento a empresas que lo necesitan antes de descargar en el drenaje, así como trampas de grasas a los comercios pertinentes. De ese modo garantiza que el tratamiento biológico que se da en la PITARNL sea exitoso.

Un factor importante que se debe tener en cuenta para el análisis de la PITARNL es su condición Internacional. El efluente de la PITARNL descarga en la zona de inundación del Río Bravo, un cuerpo de agua binacional compartido por México y EUA desde el Tratado de Agua de 1944. El Río Bravo es emblemático por su historia, importancia cultural, económica y social. Además el Río Bravo funciona como límite fronterizo de México y Estados Unidos. En la gráfica 7 se aprecia la cuenca del Río; nace en el estado de Colorado en EUA y recorre 2,900 kilómetros antes de terminar en el Golfo de México (Enríquez, 2003). Pero a pesar de dicha importancia el Río Bravo fue considerado en el 2009 como uno de los 10 ríos más contaminados en el mundo, según el Fondo Nacional para la Naturaleza (Berrios, 2009). Pese a que tanto para Nuevo Laredo, Tam., como para Laredo Txs., es la única fuente de agua para abastecer los CUA's correspondientes (López, 2014).



Gráfica 7. Cuenca del Río Bravo (COCEF, 2002)

La PITARNL se encuentra en operación desde su puesta en marcha conforme a los acuerdos establecidos en el Acta 297 de la CILA titulada “Programa de Operación y Mantenimiento, y la Distribución de sus Costos, del Proyecto Internacional para Mejorar la calidad de las Aguas del Río Bravo en Nuevo Laredo, Tamaulipas - Laredo, Texas” (CILA, 2012), en la cual se establecen los parámetros que debe cumplir el efluente (tabla 3) y otras especificaciones, como que los lodos son responsabilidad mexicana.

La importancia de mantener una buena calidad del efluente de la PITARNL se debe a que el agua del Río Bravo tiene usos importantes cuenca abajo. Por ejemplo, para el abastecimiento de algunas poblaciones, actividades económicas como la agricultura, ganadería, generación de energía, incluso uso recreativo; además el agua del río cumple con funciones ambientales. Con la descarga de las aguas tratadas al Río Bravo, se efectúa la reincorporación de una de las salidas de la PITARNL. Esta reincorporación de agua a la cuenca del Río Bravo es de suma importancia para Nuevo Laredo y toda la región fronteriza.

Parámetro	Condiciones de descarga agua tratada
Oxígeno Disuelta	No menor de 2 mg/l
pH	6-9
Coliformes fecales	En 30 días 200 colonias/100 ml
SS	30 días 20 mg/l
DBO ₅	30 días 20 mg/l

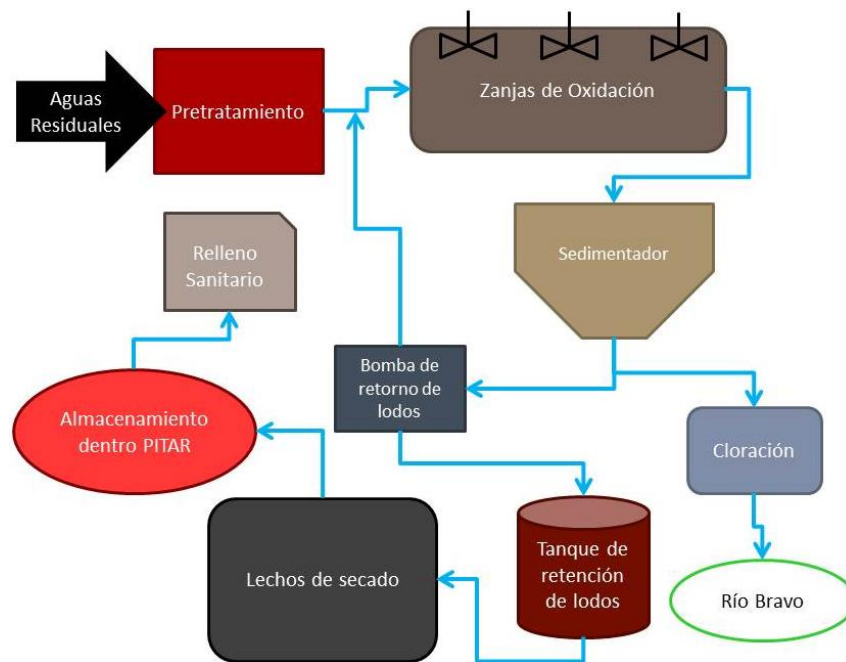
Tabla 3. Parámetros que debe cumplir el efluente de la PITARNL

La PITARNL está localizada en sur oriente de la ciudad en la confluencia del Arroyo Coyote, dentro de la zona de inundación del Río Bravo. Está diseñada para tratar 1360^l/₅ de agua típica municipal. La PITARNL como parte de su sistema eléctrico cuenta con dos subestaciones 1500 KVA a 440/254 volts y otros transformadores para abastecer las necesidades de las oficinas (Watergy, 2014). La PITARNL cuenta con cuatro fases generales para su funcionamiento (gráfica 8). La primera fase es la denominada, pretratamiento u obra de cabeza. Luego viene el tratamiento secundario, que es a base de lodos activados con la variante de zanjas de oxidación. Después está la fase de cloración, para el efluente antes de la salida de la PITARNL. Finalmente está el tratamiento de los lodos residuales. La información proviene del manual de operaciones, propuesto por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, corregido y aprobado por la Comapa y la CILA. Fotos disponibles en el [Anexo 8](#).

- I. **Pretratamiento:** El propósito general del pretratamiento es la remoción de material voluminoso que llega con el agua residual cruda. Toda basura mayor a 2 cm de grosor que no logra pasar por las rejillas es retirada, ya que podrían dañar el equipo por el que circula posteriormente (Instituto de Ingeniería de la UNAM, 1996). La estructura del pretratamiento está constituido por lo siguiente:
 - a) Dos sopladores de aire, estos dan el aire necesario para mantener suspendidos los sólidos en el agua y evitar el agotamiento de oxígeno.
 - b) Dos rejillas de barra de limpieza mecánica con el fin de eliminar los sólidos grandes mayores a 20 mm. Cuenta con dos rastrillos mecánicos accionados por motores de 5Hp para eliminar los residuos y depositarlos sobre la banda

transportadora para que lleguen a un depósito o contenedor.

- c) Cuenta con una rejilla manual, que será utilizada cuando alguna de las mecánicas no esté en servicio o las condiciones del agua, así lo requieran.
- d) Dos desarenadores tipo vórtice, dos mecanismos de transmisión y dos bombas de arena. Periódicamente la arena acumulada será vaciada a la tolva.
- e) Cuatro rejillas finas de remoción de colección de arena, estas ayudan a la limpieza de la tolva para retirar la arena acumulada.
- f) Banda transportadora, ésta lleva los sólidos retenidos en las rejillas de barra y la arena removida de las rejillas de remoción de colección de arena.



Gráfica 8. Diagrama PITARNL. Elaboración propia.

II. **Tratamiento Secundario.** En el tratamiento secundario se elimina la materia orgánica presente en las aguas residuales. LA PITARNL incluye seis zanjas de oxidación, una caja de distribución de flujo, cuatro clarificadores secundarios y los correspondientes

accesorios (Instituto de Ingeniera de la UNAM, 1996).

- a) Seis zanjas de oxidación, cada zanja de oxidación mide $98.6m$ de longitud, $38.4m$ de ancho y $6.7m$ de altura. Tiene una capacidad hidráulica individual de $17850.7m^3$.
- b) Dieciocho aireadores mecánicos, tres por cada zanja. Suministran el aire al flujo de agua residual para garantizar el oxígeno para la creación lodos activados. Cada aireador es accionado por una por un motor de 150hp, la cantidad mínima de oxígeno (O_2) que debe inyectar es de $2.13 \text{ kg } O_2/kWh$.
- c) Una caja de distribución de flujo, controla el flujo que se vierte de cada zanja de oxidación, así los clarificadores. Es un sistema de compuertas, que al abrir o cerrar cada una de estas, permite pasar al flujo por tuberías individuales y entrar en el centro de cada clarificador secundario.
- d) Cuatro clarificadores secundarios, cada uno mide $50m$ de diámetro, con un vertedor para el efluente de 47.8 metros de diámetro y una profundidad de 6.35 metros. El influente sube por la tubería para entrar por la parte central del clarificador. El licor mezclado choca contra una placa deflectora que distribuye el agua de manera homogénea sobre toda la superficie del clarificador. Mientras que los lodos son arrastrados hacia el centro del clarificador y se colectan en la tolva central. Algunos son bombeados hacia la obra de cabeza, mientras que el resto son enviados al tanque de retención de lodos. Almacén

III. **Cloración:** Instalaciones en las que se aplica el cloro como desinfectante, se asegura que no ingresen al río niveles dañinos de organismos patógenos. Están divididas en dos estructuras, el edificio de cloración, sitio destinado para los evaporadores, cloradores y los cilindros de cloro. Y los tanques de contacto de cloro, los cuales incluyen la cámara de inyección (Instituto de Ingeniera de la UNAM, 1996).

- a) Cámara de inyección de la solución de cloro, mide $10.3m$ de longitud y $2.4m$ de profundidad. La cámara está dividida en dos secciones, para aislar el flujo de ser necesario.
- b) Dos tanques de contacto con cloro. Cada una mide $32.7m$ de longitud, $14m$ de

ancho y $3.6m$ de profundidad, cuenta con 11 mamparas alternadas y perpendiculares a las paredes. El acomodo de la mamparas es para asegurar un contacto adecuado del cloro por 30 minutos.

- c) Canal Parshall, el cual tiene la finalidad de tener la medición del efluente que está por salir de la PITARNL. Para cuantificar el flujo hay que medir la profundidad del agua corriente arriba de la constricción (garganta) en el canal con rayos laser y grafica de forma automatizada los resultados en forma logarítmica, en caso necesario se puede cotejar esta medida con una curva de calibración específica para esta instalación.
- d) Cilindros de cloro, la planta puede almacenar hasta 26 tanques de cloro, pero en todo momento debe de haber 18 tanques llenos de cloro, cada cilindro contiene aproximadamente $908kg$ de cloro líquido.
- e) Dos evaporadores de cloro, cada uno tiene capacidad de $6000lb/día$, es decir que cada uno puede emitir suficiente gas cloro a los cloradores.
- f) Dos cloradores, los evaporadores mandan el gas cloro por ductos hasta los cloradores. Por su parte el personal debe estar atento a la cantidad de cloro que se aplica para que se lleve a cabo la desinfección de forma correcta.
- g) Oxigenación y eliminación de cloro residual.

IV. **Manejo de lodos:** Consiste en dos estaciones de bombeo de retorno de lodos, un tanque rectangular de concreto armado para la digestión anaerobia y espesamiento de los lodos y 80 lechos de secado de concreto armado, con camas de filtro de grava-arena graduada.

- a) Dos estaciones de bombeo de retorno de lodos de desecho, cada una cuenta con tres bombas para extraer los lodos sedimentados de los sedimentadores secundarios, un porcentaje se envía a las instalaciones de cabeza para que se mezclen con las aguas crudas, mientras que el resto se envía al tanque de retención de lodos de desecho.
- b) Tanque de retención de lodos de purga, cuenta con dos celdas individuales a las que llega el lodo de retorno procedente de las bombas de retorno de lodos, para enviarlos posteriormente a los lechos de secado.

- c) Tres bombas de lodos de purga de desplazamiento tipo tornillo, colocadas junto al tanque de retención de lodos para enviar los lodos a los lechos de secado.
- d) Tres sopladores de aire de desplazamiento positivo, la función es inyectar aire al tanque de retención con el fin de propiciar la biodegradación final de la materia orgánica, digestión aerobia de los lodos, así como eliminar malos olores provenientes de los lodos. El tiempo aproximado de retención es de 12 horas, antes de pasar a los lechos de secado.
- e) 80 lechos de secado, cada uno tiene dos tuberías perforadas de PVC, cubierta por varias capas de grava y arena graduada. El 90% de los lodos es agua, la cual se filtra, para ser devueltos a la estación de bombeo de la PITARNL. El tiempo de retención de los lodos en los lechos es de aproximadamente de 3 semanas en condiciones normales de clima.

El manejo de los lodos de la PITARNL, consiste en un tanque rectangular de concreto armado para el espesamiento y digestión aerobia de los lodos y 80 lechos de secado de concreto armado, con camas de filtro de arena y grava graduada. Los lodos tratados deben cumplir la norma mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (tablas 3, 4 y 5) ya que su disposición final es en territorio mexicano (CILA, 2012), asumiendo que los lodos solo afectan al lado mexicano.

Contaminante (determinadas en forma total)	Excelentes Mg/Kg en base seca	Buenos Mg/Kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7 500

Tabla 4. Límites máximos permisibles de metales pesados en bio-sólidos de la NOM.004-SEMARNAT-2002.

Sin embargo se debe notar que el cumplimiento de las normas mexicanas no garantiza un medio

ambiente sano, ya que aunque se cumpla con la norma puede presentar contaminación, pues existen contaminantes que la norma no contemplaba, afectando la salud de los ecosistemas (Olivas-Enriquez, et al., 2011). De ahí la importancia de dar una estabilización de los patógenos en los lodos residuales y obtener un beneficio de los mismos.

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

Tabla 5. Límites máximos permisibles para patógenos en lodos y bio-sólidos de la NOM-004-SEMARNART-2002

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	✓ Usos Urbanos con contacto público directo durante su aplicación
		✓ Los establecidos para B y C
Excelente o bueno	B	✓ Usos urbanos son contacto público directo durante su aplicación
		✓ Los establecidos para C
Excelente o bueno	C	✓ Usos forestales
		✓ Mejoramiento de suelos
		✓ Usos agrícolas

Tabla 6. Aprovechamiento de los bio-sólidos, NOM-004-SEMARNAT-2002.

Una de las principales desventajas de la forma de manejo actual de los lodos en la PITARNL es el espacio insuficiente, tanto en los lechos de secado, como el espacio de almacenamiento dentro de la PITARNL, antes de la disposición final en el relleno sanitario; así como los impactos ambientales potenciales que tiene puesto que son considerados como desechos. La digestión aerobia está contemplada dentro del manual para el manejo de lodos que propone CONAGUA (CONAGUA, 2007); y que es una de las técnicas más usadas, puesto que los lodos digeridos

pueden ser empleados como fertilizante. Sin embargo, las desventajas de la digestión aerobia es que su proceso es altamente influenciado por las condiciones ambientales, libera GEI, así como altos costos de energía y mantenimiento (CONAGUA, 2007). El consumo energético del manejo de lodos se suma la cantidad de energía eléctrica que consume el proceso de la PITARNL, por lo que fomenta el estado de estrés entre agua y energía.

Por otro lado existe la posibilidad de utilizar el potencial energético de los lodos que podría dentro de la misma PITARNL. Mediante la producción de biogás, por medio de la digestión anaerobia, aprovechando los sólidos suspendidos volátiles (Metcalf & Eddy, 1994). A su vez el biogás puede ser transformado por medio de cogeneración en corriente eléctrica, lo que desplazaría la energía. La corriente eléctrica podría aprovecharse dentro de la misma PITARNL, ya que el consumo de energía es parte esencial del funcionamiento de la planta (tabla 7). Se tendría que explorar la posibilidad de utilizar la energía generada en los clarificadores o bien, cumplir con las especificaciones que Comisión Federal de Electricidad exige para inyectar la energía a la red. De esa forma se reincorporarían los lodos residuales, se disminuyen las emisiones de GEI por la energía y se contribuiría al cierre del CUA en Nuevo Laredo.

Área	Consumo <i>KW/Hr</i>	Porcentaje
Estación de bombeo	230 360	30.3836%
Obra de cabeza	19 091	2.5180%
Zanjas de Oxidación	411 676	54.2986%
Clarificadores	1 881	0.24810%
Estación de bombeo de retorno de lodos	48 791	6.4354%
Cloración	15 800	2.0840%
Tanque de lodos de desecho	4 501	0.5937%
Áreas Generales	26 026	3.4327%
Total	758 171	100%

Tabla 7. Gasto energético de la PITARNL por áreas de proceso.

Recapitulando, en este trabajo se plantea que la PITARNL debe contar con un manejo de lodos

sostenible, mediante la reincorporación de los lodos residuales a través de la generación de energía renovable, disminuyendo así las emisiones de GEI. Esta opción es sumamente necesaria dado que actualmente la PITARNL trabaja al 75% de su capacidad y con el fuerte crecimiento demográfico que presenta Nuevo Laredo, alcanzará su máxima capacidad de diseño en el año 2016. Por otro lado los costos del manejo de lodos pueden llegar a representar hasta un 25% del costo de operación de la planta (Howard, et al., 1979). En la PITARNL el manejo de lodos actual es 180 pesos por metro cubico de lodo residual, ya que según información proporcionada por la CILA, en 2013 el gasto por disposición de lodos fue de 184,202.32 pesos Un buen manejo reduciría esos costos o compensaría con alguna utilidad generada por su aprovechamiento.



Capítulo IV. Manejo y aprovechamiento de los lodos residuales de la PITARNL: cumplimiento de la norma, la eficiencia energética y las emisiones de GEI.

La PITARNL se considera una planta eficiente ya que cumple con la remoción de contaminantes del agua. La PITARNL supera todos los parámetros que debe cumplir, firmados por la CILA en el acta 279 (tabla 3, pág. 42). Por ejemplo en Octubre de 2012 el promedio de DBO₅ fue de 3.89^{mg/l} (tabla 8), no obstante la norma se cumple con tan solo 20^{mg/l}, es decir la norma fue superada en mejorar la calidad con 16.11^{mg/l}. En cuanto a los sólidos suspendidos totales la norma se excede en 13.25^{mg/l}. En el caso del oxígeno disuelto, se excede en cumplimiento con 6.26^{mg/l} por arriba de la norma. El cumplimiento de los parámetros hace que la PITARNL pueda ser considerada una planta modelo para México en el cumplimiento de las normas mexicanas⁸. Sin embargo en el manejo de lodos tiene muchas oportunidades de mejora.

Parámetro	Condiciones de descarga para el agua tratada	Promedios medidos en el efluente Octubre 2012
Oxígeno Disuelto	No menor de 2 ^{mg/l}	8.26 ^{mg/l}
pH	6-9	7.36
Coliformes fecales	En 30 días 200 colonias/100 ml	<3 ^{NPM} /100ml
SS	30 días 20 mg/l	6.75 ^{mg/l}
DBO ₅	30 días 20 mg/l	3.89 ^{mg/l}

Tabla 8. Comparación de normas con datos del efluente Octubre del 2012. Datos proporcionados por la CILA.

La superación de las normas se atribuye principalmente a tres factores, la supervisión de la CILA, la construcción y buen diseño de la planta, así como el óptimo manejo de administración en su operación y mantenimiento. Sin duda los factores están correlacionados, pues la intervención de la CILA impacta en la administración, así como lo hizo con el diseño y construcción de la planta.

⁸ NOM-003-SEMARNAT-1997, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

NOM-001-SEMARNAT-1997, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Sin embargo la superación de los parámetros también tiene otra clase de impactos importantes. Por ejemplo el aumento del gasto energético y crecimiento de los lodos residuales, son consecuencia de la superación de los parámetros. La materia orgánica que se logra retirar del efluente, queda retenido en los lodos residuales; así mismo a mayor volumen de lodos es necesaria más energía para el manejo de estos.

No obstante el problema real no es la superación de los parámetros en el efluente, ni siquiera la generación de lodos. De hecho la generación de lodos es un problema que enfrenta Latinoamérica, pues como ya se mencionó el tratamiento de aguas residuales por medios de lodos activados es la forma más común, y su desventaja es la generación excesiva de lodos. El problema más grave es que la generación de lodos representa una acumulación de materia que se concentra y genera contaminación. Ahora bien, legalmente esta acción en México es permitida, pues los lodos pueden ser dispuestos en rellenos sanitarios, a pesar que no cierran el CUA. Por ejemplo actualmente la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza COCEF junto con la CILA y otras instituciones, trabajan en proyectos para solucionar la acumulación de lodos de la PITAR Tijuana-San Diego. La situación de la PITARNL no es diferente, los lodos son mexicanos por lo que cumplen con las normas mexicanas, sin embargo con esa disposición los lodos residuales representan pérdidas de material y energía en el CUA.

Actualmente el manejo de los lodos en la PITARNL representa el mayor problema logístico y económico de la planta (Pérez Faz, entrevista 2014). Los lodos residuales se vuelven un problema logístico en el momento en el que el espacio de secado y almacenamiento dentro de la planta se satura. Cuando eso ocurre es necesario transportar los lodos residuales a su disposición final en rellenos sanitarios que están concesionados a la empresa Proactiva Medio Ambiente Setasa, S. A. de C. V., para disponer los lodos es necesario llegar a acuerdos con dicha empresa. En acuerdos anteriores se establecieron cuotas que la PITARNL debía pagar para que sus desechos sean recibidos en los rellenos, sin embargo en recientes negociaciones, lograron eliminar el costo por disposición (Negrete, entrevista, 2014). Sin embargo la PITARNL debe cubrir los gastos de transporte para mover los lodos de la PITARNL al relleno (Pérez Faz, entrevista, 2014).

Pero ni aun así la PITARNL logra de disponer los lodos en rellenos sanitarios. La situación de los lodos residuales ocupa la atención de la administración interna de la PITARNL respecto a cómo mejorarlo ante las problemáticas. Actualmente se tiene la intención de desarrollar proyectos

pilotos para mejoren el manejo de los lodos, para su disposición final fuera de la planta (Pérez Faz, entrevista, 2014). Por ejemplo, ese momento se aprovechaba aproximadamente el 12% de los lodos residuales para producir composta (Pérez Faz, entrevista, 2014). Es un proyecto pequeño, pero llama la atención pues surgió de la necesidad de hacer algo con los lodos. El Gerente de Saneamiento conto que hace tiempo se experimentó con una pequeña cantidad de lodos, poniendo en tambos sin oxígeno generando biogás, que fue utilizado en la cocina para servicio de los operarios, cuando se terminó no se retomó el proyecto (Pérez Faz, entrevista, 2014). Estos proyectos se han desarrollado para evitar los problemas logísticos y económicos, pero continúa concibiendo a los lodos como desechos.

Actualmente se explora la posibilidad de extender el proyecto de composta a gran escala (Pérez Faz, entrevista, 2014). Sin duda es un proyecto en el cual habría una reutilización de la materia, aunque tiene ciertas desventajas. En la intención de ampliación de este proyecto se quiere aprovechar las 10 toneladas de lodo que se generan diariamente dentro de la planta. Para el compostaje que se pretende realizan en la PITARNL es necesario mezclar los lodos residuales con materiales que le den cuerpo, como la poda de los jardines de Nuevo Laredo, estos materiales serían transportados a la planta y de ser necesario triturarlos, por lo que hay emisiones de GEI por los vehículos al transportar dichos materiales a la planta; aunado aumentarían el volumen de los lodos, es decir producirían más de 10 toneladas de fertilizante orgánico al día.

Es importante mencionar que el compostaje necesita aireación, es decir aumentaría también el gasto energético y con ello las emisiones de GEI por mayor consumo de energía. Además de ello el propio proceso de compostaje emite GEI, pues las bacterias aerobias producen dióxido de carbono (CO₂) y metano (que es 21 veces más dañino a la atmósfera que el CO₂) liberándolos a la atmósfera. Adicionalmente las 10 toneladas de composta que se generarían diariamente tendrían que tener un mercado. Anáhuac Nuevo León se ve como una opción puesto que es una zona agrícola; sin embargo está a 80km de Nuevo Laredo, por lo que el transporte nuevamente aumentaría considerablemente las emisiones de GEI. Aunado a este proyecto se recuerda que el aprovechamiento de recursos locales es importante por la sostenibilidad, es decir en este proyecto en vez de aprovechar los recursos locales en Nuevo Laredo, genera una fuga de estos.

Por su parte titular de la CILA en Nuevo Laredo, confirmó que consideran a la PITARNL como eficiente por superar los parámetros en el efluente que marca el Acta 279 que rige a la planta

(Boone, entrevista 2014). Por otro lado al cuestionarle acerca de los lodos, señaló que el manejo actual de los lodos es conforme a la ley (Boone, entrevista, 2014). Pero si se tiene algún proyecto para mejorar el manejo de lodos residuales y lograr que la planta sea sostenible, la CILA está abierta a recibir propuestas, siempre y cuando el proyecto esté dentro de la normativa mexicana que enmarca el manejo de los lodos (Boone, entrevista, 2014); así como que haya sido aprobado por la Comapa (Negrete, entrevista, 2014). Sin embargo el enfoque de la CILA es supervisar la PITARNL para cumplir con la calidad del efluente (Boone, entrevista, 2014); no se ve en el manejo de lodos un problema binacional mientras que este no sea dispuesto en las zonas de inundación del Río Bravo, no obstante han apoyado a la planta para conseguir la reintegración de los lodos (Negrete, entrevista, 2014).

Por otro lado el crecimiento de la ciudad, el trabajo de la Comapa y la propia industria logran que la mayoría de las aguas residuales industriales este concentradas en la planta Norponiente de la ciudad (Pérez Faz, entrevista, 2014). De ese modo la PITARNL recibe en su mayoría aguas residuales domésticas, así como industriales pre-tratadas y comerciales con bajos niveles de grasa (Negrete, entrevista, 2014). Como se ha mencionado la particularidad de cada ecosistema urbano es importante, en caracterización del influente en la PITARNL no es un problema, pues se monitorea constantemente. El influente de la PITARNL es constante y la materia orgánica es el principal componente, es decir contiene pocos desechos industriales (Pérez Faz, entrevista, 2014). Aunado en el manejo de lodos de la PITARNL no agregan ningún compuesto químico para el espesamiento de los lodos. Lo que asegura que los lodos no contienen químicos adicionales que puedan afectar sus reutilizaciones.

Ahora bien la PITARNL trata el 90% de las aguas tratadas de Nuevo Laredo. Los principales productos que genera, son el efluente y los lodos residuales. El efluente se reutiliza mayormente reincorporándolo al Río Bravo, aunque existe un sistema de bombeo de $30\frac{l}{s}$ para regar un parque de Golf. El efluente descargado al Río es utilizado río abajo en actividades, como la agricultura, generación de energía, recreativo, y para uso doméstico en las poblaciones de Reynosa, Matamoros, Río Bravo, Miguel Alemán, Cd. Mier y Díaz Ordaz en Tamaulipas, así como ecosistemicas, ya que se debería asegurar un volumen para el Delta del Río Bravo, una zona natural protegida por la Semarnat. Por otro lado los lodos residuales, se aprovechan de manera marginal; si se aprovecharán en mayor proporción se reincorporarían en ciclos

productivos y favorecería el cierre el CUA de Nuevo Laredo. Haría falta aprovechar el resto de los productos las otras PTAR's de Nuevo Laredo, que representan tan solo el 10% de las salidas del CUA de Nuevo Laredo.

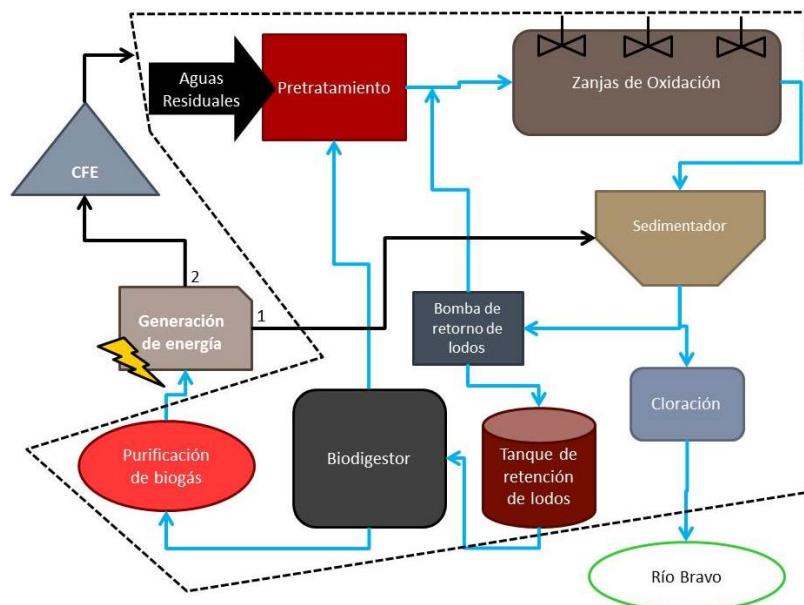
El consumo energético de la PITARNL también la hace particular, es un consumo energético similar a la PTAR del Noreste en Monterrey, la cual invirtió en nueva tecnología para lograrlo. Lo singular de la PITARNL es que mediante un ahorro de energía lograron ese resultado; este ahorro consiste en apagar los aireadores por un tiempo en el cual no se afecte el desempeño de las bacterias pues no se compromete el oxígeno disuelto. Es una administración del consumo energético, decir programan los encendidos y apagados de los aireadores de forma escalada, sin dejar de monitorear el oxígeno disuelto, en otras palabras no arrancan todos al mismo tiempo, ni en horas picos en las que Comisión Federal de Electricidad cobra a mayor precio el *KWh*. Dicho proyecto así como sus acciones nacieron de la necesidad de ahorrar energía y sobre todo recursos económicos, por lo que fue emprendido por la administración (Pérez Faz, entrevista, 2014).

Recapitulando la información expuesta hasta ahora, se propone el aprovechamiento de los lodos residuales de la PITARNL para la generación de energía. El proceso comenzaría con la implementación de un biodigestor anaerobio aprovechando los lodos que llegan al tanque de retención de lodos. Es decir en vez de esperar la digestión aerobia y la sedimentación de los lodos, estos entrarían al digestor, donde se aprovechara son sólidos volátiles de los lodos para producir biogás. En el propio digestor se capturaría el biogás, para después extraerlo y purificarlo, posteriormente por medio de cogeneradores⁹ se generaría una corriente eléctrica que podría ser utilizada dentro de la misma planta como opción 1 en la gráfica 9 o bien reinyectarse a la red como opción 2. De esta forma además de los beneficios ecológicos que se esperan se mejora el problema de logístico de los lodos, pues los residuos se reducen notablemente, ya que el gas será aprovechado para la generación de biogás.

Se considera que esta sería una opción viable ya que reincorporaría la totalidad de sus productos en ciclos productivos. Además en el proceso la digestión anaerobia evita las emisiones de metano directo, quemando para generar energía, logrando un desplazamiento de energía proveniente de fuentes de alto impacto. Además se aprovecharían los recursos locales evitando emisiones de GEI por transporte, que como ya se mencionó en la sostenibilidad el

⁹ Generadores que han mostrado las mejores eficiencias en la generación de energía.

aprovechamiento de los recursos locales es importante. Con este aprovechamiento hay una reincorporación de los recursos, una disminución de las emisiones de GEI, y el aprovechamiento de los recursos locales. De ese modo se logra que la PITARNL sea una planta sostenible y en que en gran medida se cierre el CUA de Nuevo Laredo Tamaulipas.



Gráfica 9. Diagrama de la propuesta de aprovechamiento de los lodos residuales para generar energía en la PITARNL. Elaboración propia.

4.1 Evaluación del manejo de lodos residuales de la PITARNL

La metodología propuesta por el IMTA, para la evaluación de las plantas tratadoras, a pesar de estar enfocada para plantas de tratamiento es una herramienta para identificar procesos o puntos de mejora de las plantas. Como se ha descrito anteriormente, el cumplimiento de los parámetros para la PITARNL en realidad no es un problema, por lo que la búsqueda de mejoras es indispensable. Por esa razón se utiliza ésta metodología para evaluar el tren de lodos de la PITARNL. La metodología plantea llevar acabo el diseño, por lo que se utiliza la información del manual, no obstante esa información difiere de la información de práctica, en especial en el tren

de lodos, ya que las condiciones climatológicas de Nuevo Laredo lo afectan significativamente. Además por otro lado la planta difícilmente trabajará al 100% de su capacidad, dados ciertos cambios en la planeación demográfica de Nuevo Laredo, este hecho sesgará la evaluación de forma positiva pues se supone que la infraestructura estará sobrada.

Para la evaluación del tren de lodos de la PITARNL se utilizaron los datos de diseño de la planta. En el manual de operación de la PITARNL se menciona que la planta está diseñada para generar 28 l/s de lodos de purga cuando trabaja al 100% de su capacidad, 34 cuando trabaja al 150%. El manual también menciona que el tanque de retención de lodos tiene un volumen de 2937 m^3 . En el tanque de lodos el lodo se espesa al 1%, lo que ocurre aproximadamente en 24 hrs. De ahí los lodos pasan a los lechos de secado, cada lecho mide 15 m de ancho, 35 m de longitud y 0.5 m de profundidad. Para coleccionar el sobrenadante de los lodos, los lechos cuentan con tubería perforada debajo de varias camas arena y grava, 75 mm de grava de 20 mm , 75 mm de grava de $6\text{-}12\text{ mm}$, 75 mm de arena de $1.5\text{-}3$ y finalmente otra de tamaño de partícula 200 con 5 mm de profundidad. El tiempo de secado de los lodos es de 3 semanas en condiciones normales; Nuevo Laredo, tiene una temperatura media a lo largo del año promedio de 22.8 grados centígrados, sin embargo en días de verano puede alcanzar hasta 49 grados, mientras la temperatura más baja que se ha registrado de menos 7.9 grados (Servicio Meteorológico Nacional, 2011). El promedio de precipitación que registra el Servicio de Meteorología Nacional desde 1951 a 2010 es de 18.9 mm . A pesar que la mayor parte del año en Nuevo Laredo las condiciones climatológicas son favorables, los lodos pueden llegar a tardar hasta un mes o incluso más, si las condiciones no son favorables. Por ejemplo en temporadas de lluvias los lodos suelen tardar más en secar, esto ocasiona problemas en la planta con el manejo no solamente en el almacenamiento dentro de la PITARNL, sino por el número de los lechos de secado.

Para evaluar el diseño del tanque de retención de lodos, se tiene en cuenta que según los datos de diseño nos dice que cuando la PITARNL trabaja a 1360 l/s , genera 28 l/s de lodos de purga, es decir lodos que se direccionan al tanque de retención, tanque con capacidad de 2937 m^3 :

$$28\text{ l/s} \left(\frac{1\text{ m}^3}{1000\text{ l}} \right) \left(\frac{86400\text{ s}}{1\text{ d}} \right) = 2,419.2\text{ m}^3/\text{d}$$

Con este cálculo se ve que el tanque es suficiente si estos pasan un día en el tanque. Por otro lado se sabe que la planta no trabaja a 1360 l/s por lo que el tanque es sobrado; de hecho el tanque está

diseñado para retener el lodo de la purga si llegara a trabajar al 150%.

Para determinar la cantidad de área lechos se tomó en cuenta la norma del estado de Texas que por cada libra de DBO₅, es necesario 7.7 ft², para su secado (Negrete, entrevista, 2014). Como la planta está diseñada para 220 mg/l se tiene lo siguiente:

$$DBO_{5\text{esperado}} = 1360 \text{ l/s} \left(220 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = 299200 \frac{\text{mg}}{\text{s}} = 25850.88 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 56,871.936 \frac{\text{lb}}{\text{día}}$$

$$\text{Área de secado} = 56871.936 \frac{\text{lb}}{\text{día}} \left(7.7 \frac{\text{ft}^2}{\text{lb}} \right) = 437913.9072 \frac{\text{ft}^2}{\text{día}} = 40,683.572 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

$$\begin{aligned} \text{Área de aprovechamiento de una lecho} &= \text{Área lecho} - \text{Área de la rampa} \\ &= (15\text{m})(35\text{m}) - (5\text{m})(2.5\text{m}) = 512.5 \frac{\text{m}^2}{\text{lecho}} \end{aligned}$$

$$\text{Numero de lecho} = \frac{40683.572 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}}{512.5 \frac{\text{m}^2}{\text{lecho}}} = 79.38 \frac{\text{lecho}}{\text{día}} \rightarrow 80 \frac{\text{lecho}}{\text{día}}$$

Condiciones actuales de operación	Puntos	PITARNL
Control		
Muestreo automatizado y control automático de volumen	5	X
Medición de volumen automatizado y muestreo manual	3	3
Medición manual de volumen y muestreo manual	2	X
No se realiza el muestreo y/o medición del volumen	0	X
Capacidad		
150% de la producción calculada de lodos	25	X
125% de la producción calculada de lodos	20	X
100% de la producción calculada de lodos	15	X
75% de la producción calculada de lodos	0	X
50% de la producción calculada de lodos	-10	-10

Tabla 9. Evaluación del manejo de lodos de la PITARNL.

Los cálculos para los lechos de secado, nos dicen que son necesarios 80 lechos de secado por día, cuando la PITARNL trabaja al 100% de su capacidad hidráulica y con una carga orgánica de DBO_5 220 mg/l . Sin embargo los lodos están durante casi 3 semanas en los lechos antes de pasar al almacenamiento dentro de la planta, si los lodos tardaran un día en deshidratarse los lechos serían suficientes, pero no es así. Ahora bien, la PITARNL trabajo en Octubre del 2012 con un influente promedio de 854.57 l/s , así como una carga orgánica de área 142.97 mg/l , bajo esas condiciones el número de lechos de secado necesarios para la planta disminuye.

La evaluación total del tren de lodos de la PITARNL obtuvo una calificación de menos siete en cuanto al diseño de este. El diseño de una planta es importante, incluso es el factor principal para cumplir con los parámetros, sin embargo no lo es todo, pues las buenas prácticas administrativas y de los operarios contribuye a que se logre el cumplimiento del acta en el caso de la PITARNL. Por ejemplo, a pesar de la insuficiencia de los lechos de secado, la calidad final de los lodos se reporta como excelente o clase A (tablas 5 y 6). Un aspecto interesante es que a pesar que existe una cantidad menor de lechos de los demandados utilizan solo la mitad de estos, probablemente a causa de que los lodos están más espesados pues algunas veces los lodos pasan más tiempo en el tanque de retención de lodos, o bien que la carga organica en el influente de la planta ha disminuido.

Para la operación del manejo de lodos, puede normalizarse cuando la PITARNL trabaja de forma constante como lo hace ahora. Sin embargo es preciso comentar que se debe supervisar de forma constante, para detectar a tiempo problemas que desencadenen en el no cumplimiento del acta 279 y/o la norma respecto a los lodos. Por otro lado la determinación de diversos parámetros se hace mediante cálculos; mientras que para la medición del volumen se hace de forma manual. Es por eso que se decidió darle la puntuación de tres pues el sistema puede llegar a sistematizarse pero el muestreo debe hacerse de forma manual.

Es preciso aclarar que la evaluación se refiere únicamente al diseño, en lo que respecta a la calidad, los lodos cumplen con la calidad de la norma mexicana. La norma indica que los lodos después de los lechos de secado deben pasar a rellenos sanitarios, pero según la calidad que reportan (tabla 10), son propios para la reutilización con contacto directo a las personas. La

logística de esta última operación obliga a la acumulación de los lodos en un área de la PITARNL, hasta que esta se llena. Es entonces cuando llega el transporte para cumplir con el traslado a su destino. Son estos últimos procesos del manejo de lodos de la PITARNL los que representan un problema. Pues rápidamente se llena el área destinada para su acumulación dentro de la PITARNL, por lo cual prácticamente todo el año esta área está repleta de lodos de desecho, a pesar que cumplen con la norma de calidad.

Parámetro	Resultado	NOM-004-SEMARNAT	Unidades
Lodos excelentes			
Arsénico	< 5.0	41	mg/Kg
Cadmio	<2.0	39	mg/Kg
Cobre	117.1	1500	mg/Kg
Coliformes Fecales	<300	< 1 000	NMP/gBS
Cromo total	21.02	1200	mg/Kg
Huevos del hemilito	0	< 1	Huevos/gBS
Mercurio	0.65	17	mg/Kg
Níquel	13.6	420	mg/Kg
Plomo	28.8	300	mg/Kg
Salmonella SPP	<3	< 3	NMP/gBS
Zinc	633.6	2800	mg/Kg

Tabla 10. Evaluación de los lodos residuales de la PITARNL en Marzo de 2013.

4.2 Escenario cero de la PITARNL

Las condiciones de operación actuales de la planta se plantean como el escenario cero. Es decir se

tomaran en cuenta parámetros actuales de la PITARNL. Las condiciones reales de la planta cambian día a día, sin embargo se tienen datos establecidos, es decir la moda de los datos o bien los promedios. Para este estudio se analizaron los registros del mes de Octubre del 2012, de los parámetros se muestran en el documento de proporcionó la CILA Nuevo Laredo ([Anexo 6](#)). Para los cálculos globales se toman en los promedios obtenidos, sin embargo se anexa una tabla con los valores reales en una tabla en el ([Anexo 7](#)) donde se desarrollan los cálculos, modificando las variables más llamativas como los mínimos y máximos.

Evaluación de la eficiencia de la PITARNL escenario cero

Para la evaluación de la eficiencia de la PITARNL se presentan las fórmulas explicados en el [Anexo 3](#).

$$\ln(E_s) = 15.8741 + .8944 \ln(I_{prom}) + .4510 \ln(I_{DBO}) - .1943 \ln(E_{DBO}) - .4280 \ln\left(\frac{I_{promedio}}{I_{diseño}} \times 100\right) - .3256 \left(\begin{matrix} \text{¿ filtro percolador?} \\ \text{si} \rightarrow 1 \\ \text{no} \rightarrow 0 \end{matrix}\right) + .1774 \left(\begin{matrix} \text{¿ remoción de nutriente?} \\ \text{si} \rightarrow 1 \\ \text{no} \rightarrow 0 \end{matrix}\right)$$

$$F_{adj} = \frac{\ln(E_s)}{17.8}$$

$$E_{as} = \sum E_u(F_s)$$

$$I_{prom} = \text{influyente promedio} = 854.58 \text{ l/s} == \mathbf{19.5074 \text{ Mgal/d}}$$

$$I_{DBO} = \text{DBO en el influyente} = \mathbf{142.97 \text{ mg/l}_{promedio}}$$

$$E_{DBO} = \text{DBO en el efluente} = 20 \text{ mg/d}_{diseño} = \mathbf{3.89 \text{ mg/l}_{promedio}}$$

$$I_{promedio} = \text{Influyente promedio} = \mathbf{854.58 \text{ l/s}_{promedio}}$$

$$I_{diseño} = \text{Influyente de diseño} = 1360 \text{ l/s}$$

Se aplican los datos proporcionados por la CILA Nuevo Laredo. Primero se determina una

calificación de desempeño para después normalizarla, con el factor medio posible de la calificación de desempeño.

$$\begin{aligned} \ln(E_s) &= 15.8741 + .8944 \ln\left(19.5074 \text{ Mgal}/d\right) + .4510 \ln\left(142.97 \text{ mg}/l\right) - .1943 \ln\left(3.89 \text{ mg}/l\right) \\ &\quad - .4280 \ln\left(\frac{854.58 \text{ l}/s}{1360 \text{ l}/s} \times 100\right) - .3256(0) + .1774(0) \\ &= 15.8741 + .8944(2.9708) + .4510(4.9626) - .1943(1.3584) - .4280(4.1405) \\ &\quad - .3256(0) + .1774(0) = 15.8741 + 2.6571 + 2.2381 - 0.2639 - 1.7721 - 0 + 0 \\ &= \mathbf{18.7333} \end{aligned}$$

$$F_{adj} = \frac{\ln(E_s)}{17.8} = \frac{18.7333}{17.8} = \mathbf{1.0524}$$

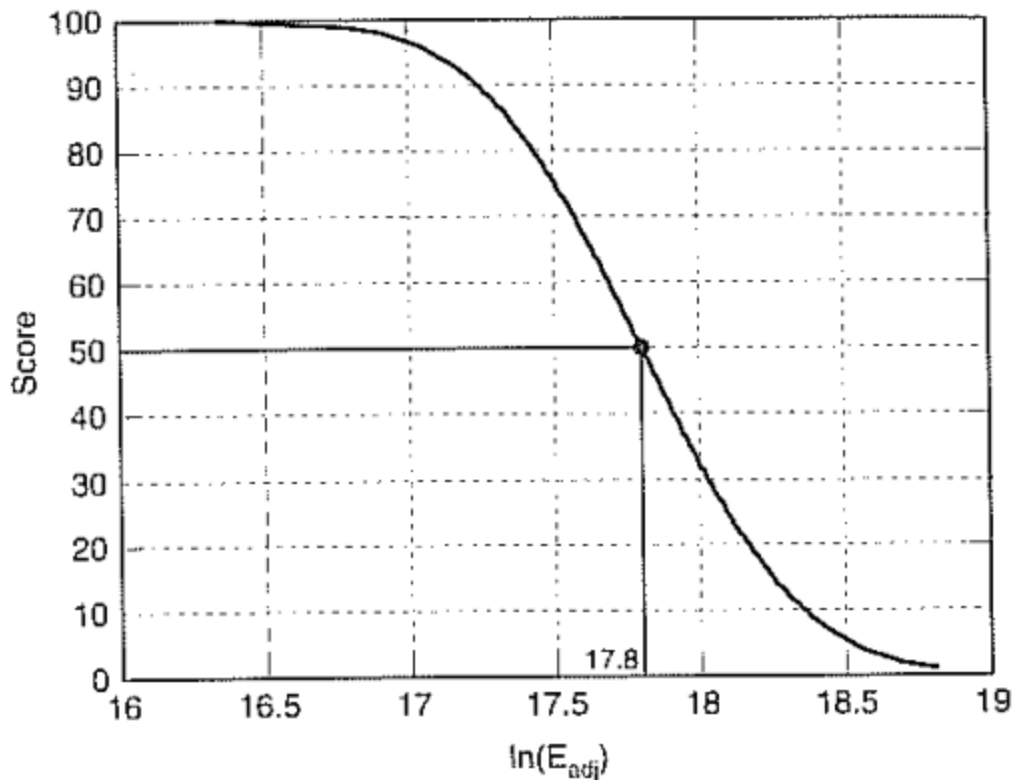
Para determinar la eficiencia energética de manera general se usa la siguiente ecuación. Según el origen de la energía se aplica un corrector que contempla las pérdidas. Para el escenario cero, toda energía que se usa es eléctrica por eso se toma el factor de $11.1 \text{ Kbtu}/\text{Kwh}$. Dicho factor está en la tabla 9 del [Anexo 3](#). El dato de la energía requerida fue proporcionado por la administración de la PITARNL.

$$\begin{aligned} E_{as} &= \sum E_u(F_s) \\ E_u &= \text{Energía requerida } \text{kwh}/\text{año} = \mathbf{9'484,156 \text{ kwh}/\text{año}} \\ F_s &= \text{factor del origen de la energía} = 11.1 \text{ Kbtu}/\text{Kwh} \\ E_{as} &= \sum E_u(F_s) = 9'108,000 \text{ kwh}/\text{año} \left(11.1 \text{ Kbtu}/\text{Kwh}\right) = \mathbf{105'274,131.6 \text{ Kbtu}/\text{año}} \end{aligned}$$

Finalmente se realiza el cálculo de ajuste de energía, mediante el cual se determinara la eficiencia global de la PITARNL, teniendo en cuenta que la variable que más afecta es la energética.

$$\begin{aligned} \ln(E_{adj}) &= \frac{\ln(E_{as})}{F_{adj}} \\ \ln(E_{as}) &= \ln\left(105'274,131.6 \text{ Kbtu}/\text{año}\right) = \mathbf{18.4721} \\ F_{adj} &= \mathbf{1.0524} \\ \ln(E_{adj}) &= \frac{\ln(E_{as})}{F_{adj}} = \frac{18.4721}{1.0524} = \mathbf{17.55} \end{aligned}$$

La eficiencia energética de la planta es buena, pues en la estandarización que maneja la metodología se dice que si la eficiencia energética es de 16 tendrá como puntuación 100 unidades en la evaluación, si obtiene un eficiencia de 19 obtendrá una puntuación equivalente a cero. La PITARNL obtuvo una eficiencia en el escenario cero de 17.55, es decir que según la gráfica equivale aproximadamente a 73% de eficiencia. Sin ninguna implementación tecnológica adicional la planta es eficiente, según la metodología, pues no solo tiene gran remoción de materia orgánica, lo que permite cumplir con los parámetros impuestos por el acta 279 de la CILA, sino que energéticamente tiene un consumo bajo. Es decir es una planta que puede ser sostenible, puesto que el requerimiento energético puede tener un desplazamiento muy significativo con la generación de energía a partir del potencial energético de los lodos.



Gráfica 10. Evaluación de la eficiencia. (MetCalf & Eddy, et al., 2013, p. 1816)

Emisiones de gases de efecto invernadero en el escenario cero

Para la determinación de las emisiones de GEI, se usan la metodología propuesta por el BID explicada en el [Anexo 4](#). Primero se determinan según la propia metodología, las constantes dadas según las condiciones actuales del proyecto.

$$B_E = S \times DOC \times MCF_S \times DOC_F \times F \times \frac{16}{12} \times UF \times GWP_{CH_4} + E_c \times EF$$

$$S = \text{cantidad de lodo generado} = 10 \text{ ton/d} \left(\frac{365d}{\text{año}} \right) = 3650 \text{ ton/año}$$

$$DOC = 0.05$$

$$MCF_S = 0.4$$

Se toma por que los lodos se disponen en un relleno sanitario.

$$DOC_F = 0.5$$

$$F = 0.5$$

$$UF = 0.94$$

$$GWP_{CH_4} = 21 \text{ kgCO}_2/\text{kgCH}_4$$

$$EG = \text{excedente de energía} = \text{Mwh/año}$$

$$EG = E - E_c$$

La energía generada para el escenario cero es nula, ya que no existe ningún tipo de generación de energía dentro de la PITARNL.

$$E = \text{energía generada} = 0$$

$$E_c = 9484.156 \text{ Mwh/año}$$

$$EF = .466 \text{ tonCO}_2/\text{MW}$$

$$L = 0.2$$

$$B_E = 3650 \text{ ton/año} \times .05 \times 0.4 \times 0.5 \times 0.5 \times \frac{16}{12} \times 0.94 \times 21 + (9098.52 \text{ Mw/año}) \times .466 \text{ tonCO}_2/\text{MW} = 4899.9567 \text{ tonCO}_2/\text{año}$$

Con los cálculos de la Metodología para determinar las emisiones de GEI, se determinó que en el escenario cero, es decir actualmente las emisiones de GEI de la PITARNL son de 4899.9567 toneladas equivalentes de dióxido de carbono al año. El dato a partir de la aplicación de la metodología únicamente contempla las emisiones por el proceso en sí, las emisiones de GEI por

transporte no son tomadas en cuenta. Por lo que si se llegará a contabilizar las emisiones de GEI por transporte aumentaría, pues según un estudio para la COCEF en 2005 las emisiones de GEI por transporte en Tamaulipas fueron de 6.92 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono, de los cuales 2.67 correspondieron a vehículos de diésel; así mismo en el estudio se estimó que las emisiones para por vehículos de diésel en 2010 serían de 3.32 y en 2015 de 3.92 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono (Chacón Anaya, et al., 2010)

4.3 Escenario uno, aprovechamiento de los lodos residuales para la generación de energía

El escenario uno o alternativo, se considera como el escenario en el que se aprovechan el 100% de los lodos residuales para la generación de energía. Ninguno de las otras variables fueron modificadas, es decir, se busca que la planta conserve su calidad en el efluente y su eficiencia energética. Para la determinación de la evaluación energética como las emisiones de GEI del escenario uno, es necesario determinar el potencial energético de los lodos residuales, para fines del estudio se hará de forma teórica.

Evaluación de la eficiencia de la PITARNL escenario uno

Determinación teórica de generación de energía

Antes de realizar la evaluación de la eficiencia de la PITARNL se deberá determinar de forma teórica la generación de energía. Para lograr dicho objetivo se utilizaron las ecuaciones de predicción de la producción de metano, en digestores de una sola etapa, explicadas por MetCalf & Eddy (2013). Se determinó dicho digestor porque es el más comunes y de fácil operación. La ecuación y sus variables se describen a continuación:

Volumen en condiciones estándares

$$V_{CH_4} = (0.35)[(S_0 - S)(Q)(1kg/10^3g) - 1.42P_x]$$

$$V_{CH_4} = \text{Volumen de metano producido en condiciones estándares } m^3/d$$

0.40 → es el factor de conversión promedio de producción de metano a 35°C

$$Q = \text{caudal de lodos } m^3/d$$

$$S_0 = \text{Solidos volatiles suspendidos en la entrada } g/m^3$$

$$S = \text{solidos suspendidos de salida } g/m^3$$

$$= S_0(\text{eficiencia de digester en conversión de solidos } \rightarrow 60\%)$$

$$P_x = \text{masa neta de tejido celular producido por día } kg/d$$

$$P_x = \frac{YQ(S_0 - S)(1kg/10^3g)}{1 + b(SRT)}$$

$$Y = \text{coeficiente de rendimiento } gVSS/gDQO$$

$$b = \text{coeficiente endogeno } d^{-1}$$

$$STR = \text{tiempo de retención de los lodos}$$

El valor típico del coeficiente de rendimiento, para casos como este se toma según la metodología como 0.08. Mientras que para el coeficiente endógeno el valor otorgado según un digester de mezcla completa es 0.03. Por su parte el tiempo de retención de los lodos se tomará como 10 días como lo recomiendo la tabla 10. Los demás datos son de Octubre del 2012, ([Anexo 6](#)) como la el promedio de la concentración de solidos suspendidos volátiles en los lodos de purga es 3161 mg/l , mientras que el promedio del volumen de los lodos de purga es 1576 m^3/d . Se anexa una tabla donde se realizan los cálculos para cada día ([Anexo 7](#)).

Temperatura de operación	SRT mínimo	SRT recomendable
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

Tabla 11. Tiempo de retención de lodos recomendado para biodigestores de mezcla completa. (MetCalf & Eddy, et al., 2013, p. 1507)

$$S_0 = 3161 \frac{mg}{l} = 3161 \frac{g}{m^3} = 3.161 \frac{kg}{m^3}$$

$$S = S_0(.60) = \left(3.161 \frac{kg}{m^3} \right) 0.6 = 1.8966 \frac{kg}{m^3}$$

$$Q_{influyente} = 1576 \frac{m^3}{d}$$

$$P_x = \frac{0.08 \left(1576 \frac{m^3}{d} \right) \left(3.161 \frac{kg}{m^3} - 1.8966 \frac{kg}{m^3} \right)}{1 + 0.03(10)} = \frac{159.4156 \frac{kg}{d}}{1.3} = 122.6273 \frac{kg}{d}$$

$$V_{CH_4} = \left(0.40 \frac{m^3}{kg} \right) \left[\left(3.161 \frac{kg}{m^3} - 1.8966 \frac{kg}{m^3} \right) \left(1576 \frac{m^3}{d} \right) - 1.42 \left(122.6273 \frac{kg}{d} \right) \right]$$

$$= \left(0.40 \frac{m^3}{kg} \right) \left(1992.6944 \frac{kg}{d} - 174.1307 \frac{kg}{d} \right) = 727.4255 \frac{m^3}{d}$$

Con eso se estima una producción de $727.4255 \frac{m^3}{d}$ de metano al día. Ahora bien se sabe que el poder calorífico del metano oscila entre 15.40 y $13.88 \frac{KWh}{kg}$, y que tiene una densidad en su estado gaseoso de $1.816 \frac{kg}{m^3}$.

$$\left(727.4255 \frac{m^3}{d} \right) \left(1.816 \frac{kg}{m^3} \right) = 1321.0047 \frac{kg}{d}$$

$$E_{teorica} = 1321.0047 \frac{kg}{d} \left(13.88 \frac{KWh}{kg} \right) = 18335.5448 \frac{KWh}{d}$$

$$E_{teorica} = \left(18335.5448 \frac{KWh}{d} \right) 30d = 550066.3453 \frac{KWh}{mes}$$

Las eficiencias de los generadores eléctricos oscilan entre 50-85%, para este caso se tomara como 60.

$$E_{teorica} = (550066.3453 \text{ KWh}/\text{mes})(.60) = 330039.8072 \text{ KWh}/\text{mes}$$

$$= 3'960,477.6864 \text{ KWh}/\text{año}$$

La generación estimada según los cálculos para el escenario uno, es de 3'960,477 KWh/mes, es importante mencionar que las eficiencias que se toman en cuenta para los cálculos, son bajas con el fin de establecer un escenario conservador. En el diseño de los biodigestores, se toman en cuenta los escenarios de máxima y mínima generación de energía para disminuir los riesgos del manejo de gas y aumentar las eficiencias de todo el proceso. Con ese estimado de energía se continúa con la evaluación de la eficiencia para el escenario uno, tomando en cuenta el desplazamiento de energía eléctrica de fuentes de alta impacto por energía eléctrica a partir de biogás.

Ahora bien una vez obtenido con el valor de energía teórica estimada se desarrolla la metodología para determinar la eficiencia de la PITARNL, para al final comparar cuanto aumenta o disminuye la eficiencia con el aprovechamiento de los lodos residuales para la generación de energía.

$$\ln(E_s) = 15.8741 + .8944 \ln(I_{prom}) + .4510 \ln(I_{DBO}) - .1943 \ln(E_{DBO}) - .4280 \ln\left(\frac{I_{diseño}}{E_{diseño}}\%\right)$$

$$- .3256 \ln\left(\begin{matrix} \text{¿ filtro percolador?} & si \rightarrow 1 \\ & no \rightarrow 0 \end{matrix}\right)$$

$$+ .1774 \ln\left(\begin{matrix} \text{¿ remoción de nutriente?} & si \rightarrow 1 \\ & no \rightarrow 0 \end{matrix}\right)$$

$$I_{prom} = 854.58 \text{ m}^3/\text{s} = 19.5074 \text{ Mgal}/\text{d}$$

$$I_{DBO} = \text{DBO en el influente} = \frac{96 \text{ mg}/\text{l}_{\text{minimo}}}{142.97 \text{ mg}/\text{l}_{\text{promedio}}}$$

$$\frac{204 \text{ mg}/\text{l}_{\text{maximo}}}{1.8 \text{ mg}/\text{l}_{\text{minimo}}}$$

$$E_{DBO} = \text{DBO en el efluente} = \frac{20 \text{ mg}/\text{d}_{\text{diseño}}}{3.89 \text{ mg}/\text{l}_{\text{promedio}}}$$

$$\frac{6.40 \text{ mg}/\text{l}_{\text{maximo}}}{782.33 \text{ l}/\text{s}_{\text{minimo}}}$$

$$I_{promedio} = \text{Influente promedio} = \frac{854.58 \text{ l}/\text{s}_{\text{promedio}}}{949.62 \text{ l}/\text{s}_{\text{maximo}}}$$

$$\frac{949.62 \text{ l}/\text{s}_{\text{maximo}}}{}$$

$$I_{diseño} = I_{fluente de diseño} = 1360 \text{ l/s}$$

Primero se determina una calificación de desempeño para después normalizarla, con el factor medio posible de la calificación de desempeño.

$$\begin{aligned} \ln(E_s) &= 15.8741 + .8944 \ln\left(19.5074 \text{ Mgal/d}\right) + .4510 \ln\left(142.97 \text{ mg/l}\right) - .1943 \ln\left(3.89 \text{ mg/l}\right) \\ &\quad - .4280 \ln\left(\frac{854.58 \text{ l/s}}{1360 \text{ l/s}} \times 100\right) - .3256(0) + .1774(0) \\ &= 15.8741 + .8944(2.9708) + .4510(4.9626) - .1943(1.3584) - .4280(4.1405) \\ &\quad - .3256(0) + .1774(0) = 15.8741 + 2.6571 + 2.2381 - 0.2639 - 1.7721 - 0 + 0 \\ &= \mathbf{18.7333} \end{aligned}$$

$$F_{adj} = \frac{\ln(E_s)}{17.8} = \frac{18.7333}{17.8} = \mathbf{1.0524}$$

Para determinar la parte energética de manera general se usa la siguiente ecuación. Según el origen de la energía se aplica un corrector que contempla las pérdidas. Para el escenario uno, toda energía generada desplaza la energía eléctrica que importa. El factor para la energía eléctrica se usa 11.1 Kbtu/KWh , mientras que para la energía a partir de biogás se utiliza el factor 21.2 Kbtu/KWh . Dicho factor está en la tabla 9 del [Anexo 3](#).

$$\begin{aligned} E_{as} &= \sum E_u(F_s) \\ E_u &= \text{Energía requerida } \text{kwh/año} = 9484156 \text{ kwh/año} - 3960477 \text{ KWh/año}_{\text{energía biogas}} \\ &= 5'523,679 \text{ KWh/año}_{\text{energía eléctrica}} \end{aligned}$$

Con esta resta logramos obtener el valor de energía eléctrica que no será desplazada por la energía generada a partir del biogás. La cantidad de energía desplazada es equivalente al 43%, un desplazamiento significativo gracias a que el consumo de la PITARNL es bajo.

$$\begin{aligned} F_{selectrica} &= \text{factor del origen de la energía eléctrica} = 11.1 \text{ Kbtu/KWh} \\ F_{sbiogas} &= \text{factor del origen de la energía biogas} = 21.2 \text{ Kbtu/m}^3 \\ E_{as} &= \sum E_u(F_s) = 5523679 \text{ KWh/año} \left(11.1 \text{ Kbtu/KWh}\right) + 261873.154 \text{ m}^3/\text{año} \left(21.2 \text{ Kbtu/m}^3\right) \\ &= \mathbf{66'864,547.76 \text{ Kbtu/año}} \end{aligned}$$

Finalmente está el cálculo de ajuste de energía, mediante el cual se determinara la eficiencia global de la planta. Para esta metodología la principal variable es el aspecto energético, por lo que por el aprovechamiento de los lodos residuales para la generación de energía impacta de forma positiva la eficiencia de la PITARNL.

$$\ln(E_{adj}) = \ln(E_{as}) / F_{adj}$$

$$\ln(E_{as}) = \ln(62'689,286.53 \text{ Kbtu} / \text{Kwh}) = \mathbf{18.0182}$$

$$F_{adj} = \mathbf{1.0524}$$

$$\ln(E_{adj}) = \ln(E_{as}) / F_{adj} = \frac{17.0182}{1.0524} = 17.12$$

Con 17.12 como resultado de la evaluación de la eficiencia de la PITARNL en el escenario uno, aumenta 0.4312 puntos su eficiencia, lo que representa una mejora del 75 al 96% (gráfica10, pág. 61). Donde la única variable que se modifico fue la parte energética, es decir la intención es no comprometer la calidad del efluente, para dar cumplimiento al acta 279. Con este único cambio estaría convirtiéndose la PITARNL en una planta modelo, por su bajo consumo energético y sobre todo por el aprovechamiento energético de los lodos residuales. Sin duda el aprovechamiento del potencial energético de los lodos residuales, mejora la eficiencia de la PITARNL.

Emisiones de gases de efecto invernadero escenario uno

Para determinar las emisiones de GEI, se tomara en los parámetros actuales de operación de la PITARNL, sin embargo se tendrá en cuenta la generación de energía esperada y el desplazamiento de energía que habrá con el biogás. La metodología se explica en el [Anexo 4](#).

$$P_E = S \times DOC \times DOC_F \times F \times \frac{16}{12} \times L - EG \times EF$$

$$S = \text{cantidad de lodo generado} = 10 \text{ ton} / \text{d} \left(\frac{365 \text{ d}}{\text{año}} \right) = 3650 \text{ ton} / \text{año}$$

$$DOC = 0.05$$

$$DOC_F = 0.5$$

$$F = 0.5$$

$$L = 0.2$$

$$EG = \text{excedente de energía} = \text{Mwh} / \text{año}$$

$$EG = E - E_c$$

$$E = \text{energía generada} = 3'960,477 \text{ KWh/año} = 3960.477 \text{ Mwh/año}$$

$$E_c = \text{consumo de la planta} = 9'484,156 \text{ kwh/año} = 9484.156 \text{ Mwh/año}$$

$$EF = .466 \text{ tonCO}_2/\text{MW}$$

$$P_E = 3650 \text{ ton/año} \times 0.05 \times 0.5 \times 0.5 \times \frac{16}{12} \times 0.2 - (3960.477 - 9108) \times 0.466 \text{ tonCO}_2/\text{MW}$$

$$= 2586.2009 \text{ tonCO}_2/\text{año}$$

La estimación de emisiones de GEI en el escenario uno, serían de 2586.2009 toneladas equivalentes de dióxido de carbono, que en comparación con las emisiones estimadas en el escenario cero de 4899.9567 toneladas equivalentes de dióxido de carbono al año, se disminuyen en un 50%. Esta disminución son duda traerá beneficios a la región, aunado a esto podría conseguirse beneficios económicos por los bonos de carbono o bien el financiamiento del proyecto por diferentes programas por la disminución de emisiones de GEI, sin comprometer la calidad del efluente de la PITARNL.

Evaluación de los indicadores.

Finalmente para realizar una comparación final de los indicadores ambientales que se proponen en los dos diferentes escenarios, se exponen en la tabla 11, con el fin de determinar cuál escenario es ambientalmente mejor.

Manejo de lodos	Eficiencia Energética		Emisiones de GEI <i>tonCO₂/año</i>
Escenario cero:			
Digestión Aerobia-Relleno Sanitario	17.55	73%	4899.9567
Escenario uno:			
Digestión Anaerobia-Energía	17.12	96%	2586.2009

Tabla 12. Indicadores para la mejorar el impacto ambiental

Como se puede observar, la eficiencia energética se ve mejorada en un 0.4634 es decir se mejora tanto 22% en el escenario uno respecto al escenario cero, dicha mejora es relevante puesto que toma en cuenta variables de remoción de materia orgánica, ciertas tecnologías y sobre el consumo energético, es decir no solamente considera el consumo energético por metro cubico de agua tratada, sino que también evalúa la calidad de esta. Por otro la disminución de las emisiones de GEI es casi del 50% también gracias al buen manejo de los lodos residuales para aprovechar el potencial energético. Esta mejora posicionaría a la PITARNL como una planta modelo, no solo por la calidad del efluente si por su consumo energético y el desplazamiento de energía.



Capítulo V. Conclusiones

En esta última sección se desarrollan algunas reflexiones acerca de la aplicación de los conceptos del trabajo al caso que se analizó y sus resultados. La PITARNL se considera una planta eficiente por el hecho de cumplir con los parámetros para la descarga al Río Bravo. Pero llama la atención su consumo energético, que en la evaluación de la eficiencia de la PITARNL por la metodología propuesta es una variable que la posiciona como una planta muy eficiente. Las posibles propuestas de mejora continua dentro de la planta se enfocan en el manejo de lodos, por el espacio insuficiente y el gasto económico que representa.

Las particularidades de calidad del efluente como de consumo energético, hacen que la PITARNL sea una planta eficiente en comparación con la mayoría de las PTAR's de México. Pero el punto frágil de la planta es el manejo de lodos. Este proceso ocupa la atención de la administración de la PITARNL puesto que los lodos son responsabilidad de la planta. Actualmente el manejo de lodos es insostenible pese a que los lodos residuales cumplen con la norma NOM-004-SEMARNAT-1992 de bio-sólidos. Con el manejo actual de los lodos solamente se aprovecha el 12% de estos; aunado a esto se conoce que el tratamiento de lodos que se realiza en la planta libera grandes cantidades de GEI. Además la insuficiencia de instalaciones hace que el secado de los lodos sea una labor logística cuidadosa para la administración de la PITARNL.

La reincorporación de las salidas del saneamiento es importante para cerrar el CUA y lograr que sea sostenible. Ahora bien es cierto que con el aprovechamiento del 12% de los lodos residuales de la PITARNL para composta hay una reutilización de la materia. Hasta ahora esta reutilización ha sido dentro de Nuevo Laredo, pero no necesariamente dentro de la PITARNL. La principal desventaja de esta forma de reutilización, es que la materia debe ser transportada hasta el lugar de utilización. La vocación de Nuevo Laredo es el comercio y el servicio, por lo que para el aprovechamiento de los lodos residuales como composta en gran escala, es necesario transportar la composta a centros agrícolas. El proyecto de realizar composta es bueno por la reutilización de los productos de la planta, sin embargo dado el volumen de lodos que genera la planta no es viable su utilización local y menos dentro de los procesos de la PITARNL. Este modo de aprovechamiento es recomendado para plantas pequeñas, como lo son las otras plantas de Nuevo

Laredo, a fin de buscar la reincorporación del 100% de las salidas del CUA de la ciudad.

Por otro lado el aprovechamiento de los lodos para la generación de biogás, se llevaría dentro de la PITARNL con las medidas de seguridad pertinentes para disminuir los riesgos, de esta forma se reduciría el volumen de los lodos, de esa manera el problema de insuficiencia de instalaciones físicas se mejoraría. Ahora bien el biogás se aprovecharía para la generación de energía eléctrica mediante generadores. La energía generada podría utilizarse para la propia planta, dentro de las propias instalaciones para procesos programables o bien inyectándola a la red de distribución de la Comisión Federal de Electricidad. De esa forma se garantiza la reutilización de los productos de la PITARNL fomentando el cierre del CUA de forma conceptual, al reincorporar los materiales a otros ciclos productivos de los ecosistemas, además de los beneficios mencionados.

En el manejo de lodos residuales actual una de las principales desventajas son las emisiones de GEI. El proceso en si por la respiración de las bacterias genera emisiones de GEI, también se toman en cuenta las emisiones por el consumo energético para llevar a cabo dicho proceso, ya que este proceso requiere de aireación. Para la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, existe la posibilidad de la digestión anaerobia, la cual retiene las emisiones de metano directas aprovechándolas para generar energía. En la evaluación de las emisiones de GEI la digestión anaerobia para generar biogás, resultó mejor evaluada que el manejo actual, es decir se estima una reducción de las emisiones en un 50%. Es importante mencionar que estas emisiones son teóricas y para que lleguen a ser reales en la práctica, es necesario un buen diseño de la parte tecnológica, así como la capacitación de los operarios para optimizar el desempeño.

Ahora bien por otro lado se sabe que la PITARNL se considera una planta eficiente por el hecho de cumplir con los parámetros para la descarga al Río Bravo. Pero llama la atención su consumo energético, que en la evaluación de la eficiencia de la PITARNL por la metodología propuesta es una variable que la posiciona como una planta muy eficiente, en su manejo actual. Teniendo como resultado un 73% de eficiencia. Las posibles propuestas de mejora continua dentro de la planta se enfocan en el manejo de lodos, por el espacio insuficiente y el gasto económico que representa. Con el aprovechamiento de los lodos residuales para la generación de energía como se plantea en el escenario uno, la eficiencia de la PITARNL aumenta al 96%, gracias al aporte energético que conlleva. En la evaluación no contempla variables económicas, pero gracias a los beneficios ecológicos y energéticos que proporciona dicho manejo, se podrían obtener beneficios

económicos.

Por otro lado la reutilización de las salidas de la PITARNL rompe con los procesos lineales reincorporándolos a ciclos productivos; adicionalmente hay un aprovechamiento local, por lo que disminuyen las afectaciones por transporte y los beneficios se quedan en el lugar. De esa forma se plantea teóricamente una contribución para cerrar el ciclo urbano del agua de Nuevo Laredo, pues la PITARNL trata la mayoría de las aguas tratadas de Nuevo Laredo. Con esto la PITARNL se convertiría en una planta sostenible y mejoraría notablemente todo el CUA, adelantando un paso para la sostenibilidad de Nuevo Laredo con la implementación de procesos cíclicos.

La visión institucional respecto a la sostenibilidad se dá a partir de políticas que rigen a las organizaciones. No obstante estas políticas la mayoría de las veces no son cercanas a las poblaciones ni a sus necesidades, pues estas son generales ya que deben aplicar a toda la república. De ese modo el concepto de sostenibilidad se vuelve un tema que pocas logran aterrizar en acciones concretas que tengan beneficios a lo largo de tiempo, es decir se sigue teniendo la visión de procesos lineales.

El manejo de los lodos residuales de la PITARNL por medio de la digestión anaerobia para la generación de energía, es una opción más viable que el manejo actual. Logra una disminución de emisiones de gases de efecto invernadero por lo que tiene impactos medioambientales positivos, de esa forma ecológicamente es mejor. Con el aprovechamiento de los lodos residuales para la generación de energía, la eficiencia de la PITARNL aumenta notablemente, gracias al aporte energético que conlleva. En la evaluación no se contemplan variables económicas, pero gracias a los beneficios ecológicos y energéticos que proporciona dicho manejo, se podrían obtener importantes beneficios económicos.

Un actor importante dentro de la PITARNL es la CILA que es sin duda el principal factor que ha facilitado que la PITARNL cumpla con las normas pertinentes, sin embargo, institucionalmente no manifiestan interés en aprovechar los lodos residuales, cerrar el CUA de Nuevo Laredo o bien reducir las emisiones de GEI. Las políticas de la CILA se centran en el agua, sin embargo de forma personal los miembros de la CILA tienen interés en mejorar el manejo de los lodos, a fin de posicionar a la PITARNL como una planta modelo. Las intenciones de la CILA como de quienes manejan la PITARNL se han centrado en el aprovechamiento para la generación de composta, que tiene una algunas desventajas por el transporte de materiales y emisiones de GEI.

Respecto a la evaluación del manejo de lodos que propone el IMTA se enfoca principalmente al diseño ingenieril. Es cierto que la infraestructura es la principal variable para lograr el cumplimiento de las normas. Sin embargo algunas veces las acciones administrativas emprendidas también causan impactos importantes, para alcanzar las metas de las PTAR's. Por ejemplo dentro de la PITARNL una buena práctica que trajo consigo impactos importantes fue la administración de la demanda energética. Lo destacado de esto es que en evaluaciones basadas en metodologías como la que propone el IMTA, estas medidas no se evaluán. Dejando fuera las acciones del personal para cumplir con las normas y mejorar a la planta.

Una de las limitaciones de este trabajo es que se asume la estabilidad de las variables analizadas de la PITARNL. Si bien es cierto que la PITARNL es una planta muy estable, sin embargo a lo largo del año cambian sus variables, respecto al influente, la materia orgánica, así como el consumo energético. Para la mejor evaluación de la generación de energía sería necesario monitorear a lo largo de un año como mínimo la calidad de los lodos de retorno, ya que serían estos los que alimentarían al biodigestor, a fin de elegir el biodigestor más adecuado y hacer las adecuaciones necesarias para mejorar su producción de biogás, disminuir riesgos y generación de energía eléctrica. De esa forma perfilar un presupuesto económico y el tiempo en que se recuperaría la inversión, ya que aunque existen en el mundo experiencias, que este manejo es económicamente viable, cada lugar como se ha mencionado en todo el estudio, es particular y las condiciones que lo rodean impactan en variables económicas.

Con el consumo energético de la planta, la implementación del aprovechamiento de los lodos residuales para la generación de energía, así como las condiciones de descarga del efluente la PITARNL puede llegar a ser no solo una planta modelo para México, sino un referente internacional por el aprovechamiento de los recursos locales, reducir las emisiones de GEI, así como favorecer el cierre del CUA en Nuevo Laredo. Es decir ser una planta tratadora de aguas residuales sostenible, en la cual un gran porcentaje del consumo energético pueda ser autoabastecido, gracias a la administración de la demanda que se implementó en los aireadores.



Bibliografía

- Aguilar, B. I. & Saphores, J., 2009. Aspectos institucionales y políticas para reforzar el pago de los servicios de agua en Nuevo Laredo, Tamaulipas, y Laredo, Texas. *Gestión y Política Pública*, XVIII(2), pp. 341-377.
- Alonso, G., Ramírez, J. R. & Palacios, J. C., 2011. Energía nuclear en México, como alternativa para la reducción de emisiones de CO₂. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, pp. 271-273.
- Aranda, A. y otros, 2006. *El análisis de ciclo de vida como herramienta de gestión empresarial*. España: Fundación Confemetal.
- Bahri, A., 2011. *Global Water Partnership*. [En línea] Available at: http://www.gwp.org/Global/GWP-CAM_Files/AguasUrbanas.pdf [Último acceso: 6 Noviembre 2013].
- Baron, J. S. y otros, 2003. Ecosistemas de Agua Dulce Sustentables. *Tópicos en Ecología*, Issue 10, pp. 1-16.
- Barrios, J. C., 2012. *Evaluación de Ecosistemas del Milenio de España*. [En línea] Available at: <http://www.ecomilenio.es/wp-content/uploads/2012/03/18-Urbanos-web.pdf> [Último acceso: 4 Noviembre 2013].
- Berrios, J. N. H., 2009. El Bravo, en la lista de los mas contaminados. *El Heraldo de Chihuahua*, 26 Diciembre.
- Boone, G. A., 2014. *Titular del CILA México-Estados Unidos en Nuevo Laredo Tam*. [Entrevista] (30 Enero 2014).
- Cao, Y. & Pawlowski, A., 2012. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assesment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1657-1665.
- Castro, B. J. M., 2009. *Indicadores de desarrollo sostenible urbano: una aplicación para Andalucía*. Andalucía: Instituto de Estadística de Andalucía..
- CEAT, 2013. *Ficha Técnica Comapa Nuevo Laredo*, Cd. Victoria Tamaulipas: Comisión Estatal del Agua Tamaulipas.
- Ceballos, M., 1989. *La fundación de Nuevo Laredo*. México, D. F.: Grupo Editorial Miguel

Ángel Porrua.

Centro Mario Molina, 2012. *Centro Mario Molina*. [En línea]
Available at: <http://centromariomolina.org/aumento-de-temperaturas-en-el-norte-de-mexico/>
[Último acceso: 11 Mayo 2014].

Chacón Anaya, D. y otros, 2010. *Emisiones de gases de efecto invernadero en Tamaulipas y proyecciones de casos de referencia 1990-2025..* primera ed. Ciudad Juarez(Chihuahua): BECC-COCEF.

Chavarría, F. F., 2004. *2o Seminario nacional de Watergy 2004*, s.l.: s.n.

CILA, 2012. *Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y Los Estados Unidos. Sección Mexicana..* [En línea]
Available at: <http://www.sre.gob.mx/cila/>
[Último acceso: Diciembre 2012].

COCEF, 2002. *Proyecto de modernización y tecnificación de los distritos de riego del Río Conchos.* [En línea]
Available at: http://www.cocef.org/aproyectos/ExcomRioConchos2002_10_17espfinal-htm
[Último acceso: Agosto 2013].

Comapa Nuevo Laredo, 2012. *Comapa Nuevo Laredo*. [En línea]
Available at: http://www.comapanuevolaredo.gob.mx/sitio/?page_id=668
[Último acceso: 29 Mayo 2014].

CONAGUA, 2007. *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Guía para el manejo, tratamiento y disposición de lodos residuales de plantas de tratamiento municipales.* México, D. F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales..

CONAGUA, 2010. *Inventario Nacional de plantas municipales de potabilización y tratamiento de aguas residuales en operación. Diciembre 2009.* 2009 ed. México, D. F.(México, D. F.): Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA, 2011. *Situación del Subsector Agua Potable. Alcantarillado y Saneamiento Edición 2011*, México D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Conapo, 2012. *Delimitación de las zonas metropolitanas 2010.* 1° edición ed. México, D. F.: Secretaria de Desarrollo Social.

Corominas, L. y otros, 2013. *Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the*

art. *WATER RESEARCH*, pp. 5480-5492.

Davis, M. L. & Masten, J. S., 2005. *Ingeniería y ciencias ambientales*. primera edición en español ed. México D. F.(México D. F.): McGraw-Hill Companies Interamericana.

Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, 2006. *Manual de tratamiento de aguas negras = Manual of instruction for sewage treatment plant operators*. México: Limusa.

Dixon, J. A. & Fallon, L. A., 1989. El concepto de sustentabilidad: sus orígenes, alcances y utilidad en la formulación de políticas. *Society and Natural Resources*, Volumen 2.

EmbassyWorld.com Inc., 1998. *EmbassyWorld.com Inc.*. [En línea] Available at: http://www.embassyworld.com/maps/Maps_Of_Mexico/ [Último acceso: 30 Mayo 2014].

Enríquez, C. E., 2003. *El tratado entre México y Los Estados Unidos de América sobre Rios Internacionales*. Segunda ed. México D. F.: Comisión Nacional del Agua.

FAO, 2014. *World Water Day 2014: Water and Energy*. [En línea] Available at: <http://www.unwater.org/worldwaterday/about-world-water-day/world-water-day-2014-water-and-energy/en/>

Flores, O. J. I., 2008. *Las políticas de reforzamiento del pago y su impacto ambiental en la provisión de los servicios de dos organismos operadores de agua en el Norte de México*, Tijuana, BC, México: s.n.

García, R. O., 2008. El papel de las energías renovables en la política energética nacional. *Revista Legislativa de Estudios Sociales y de Opinión Pública*, pp. 225-249.

Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2011. *Tamaulipas*. [En línea] Available at: <http://tamaulipas.gob.mx/tamaulipas/municipios/nuevo-laredo/> [Último acceso: 12 Junio 2014].

González, A. R., 2011. *Evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Jiutepec(Morelos): Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Grupo del Banco Mundial, 2014. *Banco Mundial. Trabajamos por mundo sin pobreza*. [En línea] Available at: <http://datos.bancomundial.org/pais/mexico> [Último acceso: 6 Junio 2014].

Hospido, A. y otros, 2009. *Environmental assessment of anaerobically digested sludge reuse in agriculture: Potential impacts of emerging micropollutants; Department of Chemical*

Engineering, School of Engineering, University of Santiago de Compostela. Santiago de Compostela(Santiago de Compostela): s.n.

Howard, F. S., Terrence, D. A. & Gerald, F. K., 1979. Energy Production through Sludge/Refuse Pyrolysis. *Journal Water Pollution Control Federation*, Abril, 51(4), pp. 735-740.

INEGI, 2011. *Panorama censal de los organismos operadores de agua en México: Censos Económicos 2009*, México, D. F.: INEGI.

INEGI, 2013. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. [Online] Available at: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=28> [Accessed 26 Abril 2013].

Instituto de Ingeniera de la UNAM, 1996. *Manual de operación y mantenimiento, plata de tratamiento de aguas residuales Nuevo Laredo, Tamaulipas*. s.l.:s.n.

Langbein, W. B. & Hoyt, W. G., 1959. *Water facts for the Nation's future uses and benefits of hydrologic data programs*. New York: New York, Ronald Press Co..

Lino, M., 2014. Agua y energía, inseparables. *El Economista*, 21 Marzo.

López, P., 2014. *Noticieros Televisa*. [En línea] Available at: <http://noticieros.televisa.com/mexico-estados/1405/rio-bravo-recibe-descargas-aguas-negras/> [Último acceso: 13 Junio 2014].

Manahan, S. E., 2007. *Introducción a la Química Ambiental*. México, D. F.: Universidad Autónoma de México.

Marsalek, J. y otros, 2007. Urban water cycle processes and interactions. En: *Urban Water UNESCO-IHP URBAN WATER SERIES*. París: UNESCO and Taylor & Francis The Netherlands, p. 3.

Metcalf & Eddy, I., 1994. *Ingeniería Sanitaria, Tratamiento, evaluación y reutilización de aguas residuales*. Tercera ed. Colombia: McGraw-Hill.

MetCalf & Eddy, y otros, 2013. *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. 5th ed. London: McGraw Hill Higher Education.

Naciones Unidas, 1992. *Convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático*. Neva York, ONU, p. 26.

Negrete, D., 2014. *Subdirector de Proyectos Especiales del CILA México-Estados Unidos*

[Entrevista] (22 Julio 2014).

Nolasco, D. A., 2010. *Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales*. s.l.:s.n.

Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M. & Güereca, R., 2013. *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*.. Primera ed. Cd. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Olivas-Enriquez, E. y otros, 2011. Indicadores fecales y patógenos en agua descargada al Río Bravo. *Terra Latinoamericana*, Octubre-Diciembre, Volumen 29, pp. 449-457.

ONU, 2014. *Agua y Energía*. [En línea] Available at:

http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/01_2014_water_and_energy_spa.pdf

[Último acceso: 28 Febrero 2014].

ONU, 2014. *Sostenibilidad del agua y la energía*. [En línea]

Available at: http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/01_2014_sustainability_spa.pdf

[Último acceso: 27 Febrero 2014].

PARSONS, 2002. *Sistema de Agua Potable de Nuevo Laredo, Tamaulipas: Informe de diagnostico, modelaje y expansión*, Nuevo Laredo, Tamaulipas: s.n.

Pérez Faz, J. C., 2014. *Gerente de Saneamiento de la Comapa* [Entrevista] (29 Enero 2014).

Ramírez, E. C., s.f. *Composteo de lodos residuales*, Jiutepec, Morelos: IMTA.

Semarnat, 2007. *¿Y el medio ambiente? Problemas en México y el mundo*.. México: Semarnat.

SENER, 2012. *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*, México, DF: SENER.

SENER, 2012. *Prospectiva del sector eléctrico 2012-2026*, Cd. México: Secretaria de Energía.

Sener, 2013. *Prospectiva del Sector eléctrico 2013-2027*, México, DF.: SENER.

Servicio Meteorológico Nacional, 2011. *Normales Climatológicas, Tamaulipas*. [En línea] Available at:

http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75

[Último acceso: 4 Agosto 2014].

Tabasová, A. y otros, 2012. Waste-to-energy technologies: Impact on environment. *Energy*, pp. 146-155.

Turner, R. K., 1993. Sustainability: principles and practice. En: *Sustainable environmental*

economics and management: principles and practice. Belhaven Press, Londres: s.n.

Tyagi, V. K. & Lo, S.-L., 2013. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 709-715.

Villee, C. A., 2001. *Biología*. octava ed. México, D. F.(Distrito Federal): MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. de C. V..

Watergy2014 *Auditoría de Eficiencia Energética en Estaciones de Bombeo y Plantas Potabilizadoras en el Sistema Municipal de Agua y Saneamiento de Nuevo Laredo, Tamaulipas*. Nuevo Laredo COCEF-BECC



Anexos

Anexo1. Guía de Temas para la entrevista semiestructurada para informantes claves.

1. Historia de la PITAR Nuevo Laredo.
 - i. Como fue el nacimiento.
 - ii. En que se basó su diseño
2. Funcionamiento de la PITAR Nuevo Laredo.
 - i. Proceso del Saneamiento del Agua, Manuales de la PITARNL
 - ii. Proceso del manejo de lodos, manuales de operación de la PITARNL

En base a la cantidad de lodos que se generan a diario ¿le parece que el manejo de lodos residuales es adecuado?

¿Conoce el manual de operación de la PITAR Nuevo Laredo?

¿Considera que su aplica de forma correcta?

¿Le parece riesgoso el manejo de lodos residuales de la PITARNL?

¿Cómo clasificaría el desempeño en la operación del manejo de lodos de la PITARNL?

¿Cómo clasificaría el diseño del manejo de lodos de la PITARNL?

¿Cree que pudieran existir mejoras, al manejo de lodos? ¿Cuáles?

Partiendo de que el efluente de la PITARNL cumple con las normas, ¿considera relevante atender los lodos residuales?

¿Cree que los riesgos de contaminación son aceptables, por la actual disposición de lodos?

3. Economía de los manejos de lodos.
 - i. Costos de operación
 - ii. Visualiza a los lodos como desechos o cree que se puedan aprovechar.

¿Cuál considera que podría ser una buena forma de aprovechar los lodos?

Existen proyectos para la mejora de la PITARNL, ¿repercute en la generación de lodos?

4. Bi-nacionalidad

- i. La bi-nacionalidad puede favorecer a mejorar el manejo de lodos residuales.

5. Generación de energía

- i. Gasto energético alto
- ii. Generación de energía dentro de la PITARNL

Anexo2. Criterio para la evaluación del Manejo de Lodos, IMTA.

Condiciones actuales de operación	Puntos
Control	
Muestreo automatizado y control automático de volumen	5
Medición de volumen automatizado y muestreo manual	3
Medición manual de volumen y muestreo manual	2
No se realiza el muestreo y/o medición del volumen	0
Capacidad	
150% de la producción calculada de lodos	25
125% de la producción calculada de lodos	20
100% de la producción calculada de lodos	15
75% de la producción calculada de lodos	0
50% de la producción calculada de lodos	-10

Tabla 13. Criterio para la asignación de puntos en el manejo del tratamiento de aguas residuales por medio de zanjas de oxidación (González, 2011)

Anexo1. Calculo de la eficiencia de plantas tratadoras de aguas residuales. Basado en el libro de Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery de MetCalf & Eddy (MetCalf & Eddy, et al., 2013)

Para la evaluación energética de la PITARNL se toma como unidad toda la planta se aplican las

siguientes formulas. Para estimar el consumo de energía a partir del modelo logarítmico de regresión multi-parámetro para cada fuente.

$$\ln(E_s) = 15.8741 + .8944 \ln(I_{prom}) + .4510 \ln(I_{DBO}) - .1943 \ln(E_{DBO}) - .4280 \ln\left(\frac{I_{prom}}{E_{diseño}} \times 100\right) \\ - .3256 \times \left(\begin{matrix} \text{¿ filtro percolador? } & \text{si} \rightarrow 1 \\ & \text{no} \rightarrow 0 \end{matrix}\right) \\ + .1774 \times \left(\begin{matrix} \text{¿ remoción de nutriente? } & \text{si} \rightarrow 1 \\ & \text{no} \rightarrow 0 \end{matrix}\right)$$

$$I_{DBO} = DBO \text{ en el influente}$$

$$E_{DBO} = DBO \text{ en el efluente}$$

$$I_{promedio} = \text{Influente promedio}$$

$$E_{diseño} = \text{Efluente de diseño}$$

Para determinar la calificación de desempeño es necesario aplicar un factor para normalizar el dato y obtener un valor corregido. El rango de $\ln(E_s)$ va desde 16 a los 19.6, siendo el 17.8 el punto medio por lo que se valor correctivo. Se aplica la siguiente formula:

$$F_{adj} = \ln(E_s) / 17.8$$

Luego viene el ajuste según la energía que se usa, para ello es necesario factores ya establecidos

Fuente de energía	Unidades inglesas		Unidades internacionales	
	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Electricidad	<i>kBtu/KWh</i>	11.1	<i>kBtu/KWh</i>	11.1
Gas Natural	<i>kBtu/therm</i>	102.5	<i>kBtu/MJ</i>	.97
Combustóleo	<i>kBtu/gal</i>	141	<i>kBtu/L</i>	37.25
Propano	<i>kBtu/gal</i>	91	<i>kBtu/L</i>	24.04
Biogás	<i>kBtu/ft³</i>	0.6	<i>kBtu/m³</i>	21.2

Tabla 14. Factor según la fuente de energía (MetCalf & Eddy, et al., 2013)

$$E_{as} = \sum E_u(F_s)$$

E_{as} = fuente actual de energía para el uso según su origen

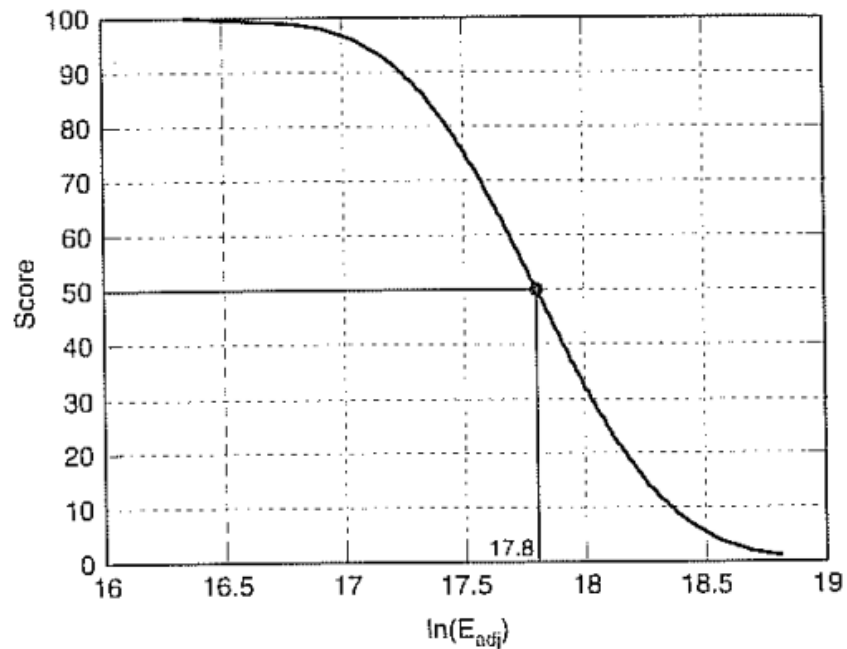
E_u = consumo de energía medida en la planta

F_s = factor de la fuente de energía

Finalmente está el cálculo de ajuste de energía

$$\ln(E_{adj}) = \ln(E_{as}) / F_{adj}$$

Una vez que se tenga ese valor se compara con la siguiente gráfica.



Gráfica 11. Evaluación de la eficiencia. (MetCalf & Eddy, et al., 2013, p. 1816)

Anexo2. *Calculo de emisiones de GEI. Basado en la Metodología propuesta por Daniel Nolasco para el BID (Nolasco, 2010).*

Todas las metodologías utilizan el mismo cálculo base para estimar reducción de emisiones:

$$E_R = B_E - P_E$$

E_R = reducción de emisiones

B_E = emisiones de base

$$P_E = \text{emisiones del proyecto}$$

Las emisiones base son aquellas que en este trabajo se consideran las emisiones del escenario cero, es decir mantener el manejo de lodos residuales actual.

Las emisiones del proyecto son las emisiones que se estiman con la implementación del proyecto, en este caso escenario uno, el aprovechamiento de los lodos residuales para la generación de energía.

El primer paso para calcular las emisiones, es seleccionar uno de los 6 escenarios propuestos por la metodología. En este caso se seleccionó el escenario 5 “Digestión aeróbica de los lodos generados” escenario actual de la PITARNL. La opción que proyectos potenciales es “La implementación de un sistema de digestión anaeróbico con recuperación de metano”, que es precisamente la opción que se analiza en este trabajo. Con la recuperación del metano se aprovechará para generar energía eléctrica. Con estas condiciones se aplican las siguientes ecuaciones para simplificar el cálculo de emisiones de GEI:

$$B_E = S \times DOC \times MCF_S \times DOC_F \times F \times \frac{16}{12} \times UF \times GWP_{CH_4} + EG \times EF$$

$$P_E = S \times DOC \times DOC_F \times F \times \frac{16}{12} \times L - EG \times EF$$

S = cantidad de lodo generado

DOC = contenido de materia orgánica en e lodo generado

= 0.05 para lodo domestico, 0.09 lodo industrial

MCF_S = factor de corección de metano para la disposición de lodo = segun tablas

DOC_F = fracción del contenido orgánico que se transforma en biogas = 0.5 establecido

F = fracción de metano en el biogás = 0.5 establecido

UF = factor de corrección por incertidumbre = 0.94 establecido

GWP_{CH_4} = potencial de calentamiento global del metano = $21 \text{ kgCO}_2/\text{kgCH}_4$

EG = excedente de energía = $Mwh/\text{año}$

$$EG = E - E_c$$

E = energía generada

E_c = consumo de la planta

EF = factor de emisión de la red eléctrica

L = fracción de biogás que se pierde = 0.2 recomendado

Anexo3. Indicadores para determinar la mejor opción en el aprovechamiento de los lodos residuales de la PITAR Nuevo Laredo.

Con la información organizada en la tabla para los indicadores será fácil determinar, la mejor opción para el manejo de lodos respecto a los indicadores ambientales que en este trabajo se proponen.

Manejo de lodos	Eficiencia Energética		Emisiones de GEI <i>tonCO₂/año</i>
Escenario cero: Digestión Aerobia-Relleno Sanitario	17.55	73%	4899.9567
Escenario uno: Digestión Anaerobia-Energía	17.12	96%	2586.2009

Tabla 15. Indicadores para el impacto ambiental. Elaboración propia.

Anexo4. Información proporcionada por la CILA mediciones puntuales de la PITARNL

Día	Efluente (Lps)	D.Q.O (mg/l)	D.B.O ₅ (mg/l)	SST (mg/l)	SSV (mg/l)	pH	Alcalinidad (mg/l)	O.D. (mg/l)	COL. FEC. NMP/100 ml
1	898.06	24	4.8	5.6	2.8	7.26	109	8.06	<3
2	893.78	28	4.6	4.4	2.4	7.19	131	8.11	<3
3	803.78	36	5.4	5.2	3.2	7.32	160	7.77	<3
4	822.33	26	2.2	2.8	2.8	7.24	139	8.05	4
5	854.44	23	2.8	4.8	2	7.34	152	8.18	4
6	808.71	37	5.4	4.4	4.4	7.26	135	8.02	<3
7	782.33	33	3.2	1.6	1.6	7.3	152	7.75	<3
8	829.16	16	2	4.4	2.4	7.38	173	8.42	<3
9	836.83	16	2.2	5.2	3.2	7.36	160	8.36	<3
10	871.05	16	2.8	6.4	3.6	7.45	168	7.9	<3
11	869.07	28	2.6	7.2	6.8	7.39	177	7.99	<3
12	847.1	30	3.6	8.8	4.4	7.47	189	7.74	<3
13	859.84	34	4	7.2	6.4	7.31	173	7.64	<3
14	911.07	31	4	6	4.4	7.37	168	7.67	<3
15	845.76	28	1.8	8.4	5.6	7.39	185	7.49	<3
16	849.48	36	3.6	9.6	5.2	7.46	194	7.56	<3

17	858.2	22	2.2	4.8	2	7.45	189	7.9	<3
18	828.99	30	4.2	6	2	7.46	194	7.43	<3
19	874.67	31	4.6	6.8	2.4	7.38	189	8.04	<3
20	829.54	34	4.4	9.2	4	7.32	169	7.87	<3
21	837.04	21	3.2	7	4	7.31	193	7.55	<3
22	816.75	39	4.2	14.8	11.2	7.54	188	8.97	4
23	871.78	30	6.4	8.4	3.6	7.39	184	8.79	<3
24	885.56	42	6.4	8	3.2	7.39	170	8.65	<3
25	852.31	34	4.8	9.2	3.2	7.62	175	8.81	<3
26	949.62	17	5.6	8.4	6.4	7.39	179	9.09	9
27	866.68	14	2.8	6.8	4.8	7.3	153	9.64	<3
28	872.29	15	3	4	4	7.14	128	9.5	<3
29	866.21	28	5	9.6	6	7.36	136	9.09	7
30	854.91	26	4.8	9.2	5.6	7.22	157	8.92	4
31	844.61	31	4	5.2	4.4	7.32	166	9.19	<3

Tabla 16. Datos del efluente de la PITARNL, Octubre 2012

Día	D.Q.O (mg/l)	D.B.O ₅ (mg/l)	D.Q.O./ D.B.O ₅	SST (mg/l)	SSV (mg/l)	SST/ SSV	pH	Alcalinidad (mg/l)
1	230	180	1.28	196	72	36.73	7.18	223
2	259	120	2.16	120	68	56.67	7.19	253
3	260	178	1.46	132	76	57.58	7.19	240
4	193	120	1.83	220	56	25.45	7.2	244
5	220	204	1.23	164	80	48.78	7.22	261
6	251	204	1.15	120	100	83.33	7.27	265
7	234	132	1.44	104	92	88.46	7.37	274
8	190	120	2.06	44	36	81.82	7.46	290
9	247	156	1.72	88	68	77.27	7.41	312
10	268	120	2.23	120	76	63.33	7.37	316
11	228	96	2.38	124	108	87.10	7.47	312
12	207	108	1.92	96	64	66.67	7.48	307
13	261	132	1.98	84	76	90.48	7.42	238
14	289	122	2.37	80	80	100.00	7.37	303
15	206	144	1.43	72	44	61.11	7.49	312
16	212	96	2.21	100	64	64.00	7.41	312
17	214	168	1.27	76	52	68.42	7.43	303
18	262	120	2.18	96	64	66.67	7.41	320
19	252	144	1.75	140	76	54.29	7.38	320
20	270	120	2.25	520	113	21.73	7.65	370
21	289	180	1.61	110	80	72.73	7.34	315
22	263	168	1.57	76	68	89.47	7.43	315
23	260	180	1.44	92	72	78.26	7.4	323
24	264	120	2.20	112	68	60.71	7.42	319

25	257	156	1.65	76	32	42.11	7.53	306
26	279	160	1.74	184	100	54.35	7.41	315
27	258	120	2.15	233	100	42.92	7.17	197
28	271	180	1.51	125	105	84.00	7.34	286
29	272	144	1.89	80	80	100.00	7.49	297
30	291	144	2.02	164	100	60.98	7.41	297
31	253	96	2.64	80	68	85.00	7.39	293

Tabla 17. Datos del influente de la PITARNL, Octubre 2012.

Día	Qi=QE l/s	Purgas calculadas	Purgas Reales	Lodos purgados (m3/día)	Concentración Lodos purgados (mg/l)	Flujo de purga l/s
1	898.06	6.22	8	1576	13833	18.24
2	893.78	7.48	8	1576	12275	18.24
3	803.78	6.39	8	1576	14333	18.24
4	822.33	7.24	8	1576	14500	18.24
5	854.44	6.81	8	1576	12800	18.24
6	808.71	9.72	8	1576	7600	18.24
7	782.33	10.38	8	1576	7000	18.24
8	829.16	8.67	8	1576	7633	18.24
9	836.83	6.09	8	1576	11000	18.24
10	871.05	9.28	8	1576	7200	18.24
11	869.07	8.31	8	1576	6300	18.24
12	847.1	9.38	8	1576	6100	18.24
13	859.84	8.48	8	1576	5000	18.24
14	911.07	8.08	8	1576	8000	18.24
15	845.76	11.49	8	1576	4633	18.24
16	849.48	11.43	8	1576	2933	18.24
17	858.2	7.71	8	1576	7166	18.24
18	828.99	7.97	8	1576	7900	18.24
19	874.67	8.47	8	1576	7466	18.24
20	829.54	9.07	8	1576	3033	18.24
21	837.04	14.28	8	1576	5700	18.24
22	816.75	7.85	8	1576	6800	18.24
23	871.78	7.22	8	1576	7300	18.24
24	885.56	7.95	8	1576	8500	18.24
25	852.31	15.55	8	1576	6267	18.24
26	949.62	7.81	8	1576	7633	18.24
27	866.68	11.39	8	1576	7633	18.24
28	872.29	7.38	8	1576	4650	18.24
29	866.21	9.43	8	1576	4000	18.24
30	854.91	9.93	8	1576	5700	18.24
31	844.61	14.66	8	1576	5970	18.24

Tabla 18. Información de la lodos de purga de la PITARNL, Octubre 2012.

Día	SST retorno (mg/l)	SSV retorno (mg/l)	% de re- circulación	Colchón de lodos (cms)	Carga de Sólidos Suspendidos kg/m ² /día	Carga Hidráulica Superficial m ³ /m ² /día	Carga de los vertedores m ³ /m/día	Tiempo de Retención Hidráulico (hrs).	Cloro residual (mg/l)
1	13833	5966	58.82	24	52.36	9.88	129.49	16.39	1576
2	12275	5075	81.09	25	55.40	9.83	128.88	16.47	1576
3	14333	5833	61.88	26	50.22	8.84	115.90	18.31	1576
4	14500	5866	76.57	32	58.53	9.05	118.57	17.90	1576
5	12800	5300	67.02	28	49.82	9.40	123.20	17.22	1576
6	7600	3433	153.10	25	41.50	8.90	116.61	18.20	1576
7	7000	2700	130.58	24	34.73	8.61	112.81	18.81	1576
8	7633	3300	116.19	23	38.13	9.12	119.56	17.75	1576
9	11000	4633	58.94	24	38.94	9.21	120.66	17.59	1576
10	7200	2933	142.24	25	41.11	9.58	125.60	16.90	1576
11	6300	2800	126.76	22	34.23	9.56	125.31	16.93	1576
12	6100	2733	153.99	22	34.95	9.32	122.15	17.37	1576
13	5000	2533	131.94	16	27.34	9.46	123.98	17.12	1576
14	8000	3520	102.06	23	41.29	10.02	131.37	16.15	1576
15	4633	2200	363.50	20	34.01	9.30	121.95	17.40	1576
16	2933	1366	488.12	16	22.85	9.34	122.49	17.32	1576
17	7166	3266	95.86	22	33.85	9.44	123.75	17.15	1576
18	7900	3566	94.61	20	35.84	9.12	119.53	17.75	1576
19	7466	2800	124.52	23	40.51	9.62	126.12	16.83	1576
20	3033	1233	169.91	20	17.65	9.13	119.61	17.74	1576
21	5700	1466	146.17	15	31.63	9.21	120.69	17.58	1576
22	6800	2733	129.64	10	35.09	8.98	117.77	18.02	1576
23	7300	3800	126.32	10	39.72	9.59	125.70	16.88	1576
24	8500	3366	98.69	15	41.99	9.74	127.69	16.62	1576
25	6267	1466	145.12	18	35.30	9.38	122.90	17.27	1576
26	7633	3066	112.20	15	42.88	10.45	136.93	15.50	1576
27	7633	2250	104.27	10	37.90	9.53	124.97	16.98	1576
28	4650	3400	331.54	20	34.50	9.60	125.78	16.87	1576
29	4000	1733	200.06	17	25.68	9.53	124.90	16.99	1576
30	5700	2600	197.51	15	35.97	9.40	123.27	17.21	1576
31	5970	1045	199.54	12	37.35	9.29	121.79	17.42	1576

Tabla 19. Información de los lodos de purga de la PITARNL, Octubre 2012

Anexo5. Valores de puntuales de la PITARN con datos de Octubre del 2012.

Eficiencia de la PITARNL con datos de Octubre del 2012, manteniendo constante el consumo energético												
Día	I _{promedio} l/s	I _{promedio} Mgl/día	I _{diseño} l/s	I _{DBO} mg/l	E _{DBO} mg/l	no	no	lnES	Fadj	Eas	Eu KWh/año	lnEadj
1	898.06	20.50	1360	180	4.8	0	0	18.82	1.06	105274131.6	9484156	17.47
2	893.78	20.40	1360	120	4.6	0	0	18.64	1.05	105274131.6	9484156	17.64
3	803.78	18.35	1360	178	5.4	0	0	18.74	1.05	105274131.6	9484156	17.55
4	822.33	18.77	1360	120	2.2	0	0	18.75	1.05	105274131.6	9484156	17.54
5	854.44	19.50	1360	204	2.8	0	0	18.96	1.07	105274131.6	9484156	17.34
6	808.71	18.46	1360	204	5.4	0	0	18.80	1.06	105274131.6	9484156	17.49
7	782.33	17.86	1360	132	3.2	0	0	18.69	1.05	105274131.6	9484156	17.59
8	829.16	18.93	1360	120	2	0	0	18.77	1.05	105274131.6	9484156	17.52
9	836.83	19.10	1360	156	2.2	0	0	18.87	1.06	105274131.6	9484156	17.42
10	871.05	19.88	1360	120	2.8	0	0	18.73	1.05	105274131.6	9484156	17.56
11	869.07	19.84	1360	96	2.6	0	0	18.64	1.05	105274131.6	9484156	17.64
12	847.1	19.34	1360	108	3.6	0	0	18.62	1.05	105274131.6	9484156	17.66
13	859.84	19.63	1360	132	4	0	0	18.69	1.05	105274131.6	9484156	17.59
14	911.07	20.80	1360	122	4	0	0	18.69	1.05	105274131.6	9484156	17.60
15	845.76	19.31	1360	144	1.8	0	0	18.88	1.06	105274131.6	9484156	17.41
16	849.48	19.39	1360	96	3.6	0	0	18.57	1.04	105274131.6	9484156	17.71
17	858.2	19.59	1360	168	2.2	0	0	18.92	1.06	105274131.6	9484156	17.38
18	828.99	18.92	1360	120	4.2	0	0	18.63	1.05	105274131.6	9484156	17.65
19	874.67	19.97	1360	144	4.6	0	0	18.71	1.05	105274131.6	9484156	17.57
20	829.54	18.94	1360	120	4.4	0	0	18.62	1.05	105274131.6	9484156	17.66
21	837.04	19.11	1360	180	3.2	0	0	18.87	1.06	105274131.6	9484156	17.43
22	816.75	18.64	1360	168	4.2	0	0	18.77	1.05	105274131.6	9484156	17.52
23	871.78	19.90	1360	180	6.4	0	0	18.75	1.05	105274131.6	9484156	17.54
24	885.56	20.21	1360	120	6.4	0	0	18.57	1.04	105274131.6	9484156	17.70
25	852.31	19.46	1360	156	4.8	0	0	18.73	1.05	105274131.6	9484156	17.55
26	949.62	21.68	1360	160	5.6	0	0	18.76	1.05	105274131.6	9484156	17.52
27	866.68	19.78	1360	120	2.8	0	0	18.72	1.05	105274131.6	9484156	17.56
28	872.29	19.91	1360	180	3	0	0	18.90	1.06	105274131.6	9484156	17.40
29	866.21	19.77	1360	144	5	0	0	18.69	1.05	105274131.6	9484156	17.59
30	854.91	19.51	1360	144	4.8	0	0	18.70	1.05	105274131.6	9484156	17.59
31	844.61	19.28	1360	96	4	0	0	18.54	1.04	105274131.6	9484156	17.73

Tabla 20. Eficiencia de la PITARNL para el escenario cero con datos de Octubre del 2012, manteniendo

constante el consumo energético.

Eficiencia de la PITARNL con datos de Octubre del 2012, manteniendo constante el consumo energético, escenario cero													
día	I _{promedio} l/s	I _{diseño} l/s	I _{DBO} mg/l	E _{DBO} mg/l	no	no	lnES	F _{adj}	E _{as}	Eu KWh/año	BG	E _{importada} KWh/año	lnE _{adj}
1	898.06	1360	180	4.8	0	0	18.82	1.06	66864543	9484156	261873.15	5523678.61	17.04
2	893.78	1360	120	4.6	0	0	18.64	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.20
3	803.78	1360	178	5.4	0	0	18.74	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.11
4	822.33	1360	120	2.2	0	0	18.75	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.11
5	854.44	1360	204	2.8	0	0	18.96	1.07	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	16.92
6	808.71	1360	204	5.4	0	0	18.80	1.06	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.06
7	782.33	1360	132	3.2	0	0	18.69	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.16
8	829.16	1360	120	2	0	0	18.77	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.09
9	836.83	1360	156	2.2	0	0	18.87	1.06	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	16.99
10	871.05	1360	120	2.8	0	0	18.73	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.13
11	869.07	1360	96	2.6	0	0	18.64	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.21
12	847.10	1360	108	3.6	0	0	18.62	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.23
13	859.84	1360	132	4	0	0	18.69	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.16
14	911.07	1360	122	4	0	0	18.69	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.16
15	845.76	1360	144	1.8	0	0	18.88	1.06	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	16.99
16	849.48	1360	96	3.6	0	0	18.57	1.04	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.27
17	858.20	1360	168	2.2	0	0	18.92	1.06	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	16.95
18	828.99	1360	120	4.2	0	0	18.63	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.22
19	874.67	1360	144	4.6	0	0	18.71	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.14
20	829.54	1360	120	4.4	0	0	18.62	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.23
21	837.04	1360	180	3.2	0	0	18.87	1.06	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.00
22	816.75	1360	168	4.2	0	0	18.77	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.09
23	871.78	1360	180	6.4	0	0	18.75	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.11
24	885.56	1360	120	6.4	0	0	18.57	1.04	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.27
25	852.31	1360	156	4.8	0	0	18.73	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.12
26	949.62	1360	160	5.6	0	0	18.76	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.09
27	866.68	1360	120	2.8	0	0	18.72	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.13
28	872.29	1360	180	3	0	0	18.90	1.06	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	16.97
29	866.21	1360	144	5	0	0	18.69	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.16
30	854.91	1360	144	4.8	0	0	18.70	1.05	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.15
31	844.61	1360	96	4	0	0	18.54	1.04	66864543	9097512	261873.15	5523678.61	17.30

Tabla 21. Eficiencia de la PITARNL con datos de Octubre del 2012, manteniendo constante el consumo energético y la generación de energía, en el escenario uno.

Producción de Biogás con datos de la PITARNL de Octubre del 2012. La única variable es son los Sólidos Volátiles Suspendedos en los lodos de retorno.									
Día	V_{CH_4} $m^3/día$	S_0 kg/m^3	S kg/m^3	Q $m^3/día$	P_x $kg/día$	Y $gVSS/gDQO$	B $1/día$	SRT días	Factor de conversión metano a 35°C
1	1372.93	5.966	3.5796	1576	231.44	0.08	0.03	10	0.4
2	1168.63	5.075	3.045	1577	197.00	0.08	0.03	10	0.4
3	1344.02	5.833	3.4998	1578	226.57	0.08	0.03	10	0.4
4	1352.48	5.866	3.5196	1579	227.99	0.08	0.03	10	0.4
5	1222.76	5.3	3.18	1580	206.12	0.08	0.03	10	0.4
6	792.53	3.433	2.0598	1581	133.60	0.08	0.03	10	0.4
7	623.70	2.7	1.62	1582	105.14	0.08	0.03	10	0.4
8	762.79	3.3	1.98	1583	128.58	0.08	0.03	10	0.4
9	1071.58	4.633	2.7798	1584	180.64	0.08	0.03	10	0.4
10	678.81	2.933	1.7598	1585	114.43	0.08	0.03	10	0.4
11	648.44	2.8	1.68	1586	109.312	0.08	0.03	10	0.4
12	633.32	2.733	1.6398	1587	106.76	0.08	0.03	10	0.4
13	587.35	2.533	1.5198	1588	99.013	0.08	0.03	10	0.4
14	816.72	3.52	2.112	1589	137.68	0.08	0.03	10	0.4
15	510.77	2.2	1.32	1590	86.10	0.08	0.03	10	0.4
16	317.34	1.366	0.8196	1591	53.49	0.08	0.03	10	0.4
17	759.22	3.266	1.9596	1592	127.98	0.08	0.03	10	0.4
18	829.48	3.566	2.1396	1593	139.83	0.08	0.03	10	0.4
19	651.71	2.8	1.68	1594	109.86	0.08	0.03	10	0.4
20	287.17	1.233	0.7398	1595	48.40	0.08	0.03	10	0.4
21	341.64	1.466	0.8796	1596	57.59	0.08	0.03	10	0.4
22	637.31	2.733	1.6398	1597	107.43	0.08	0.03	10	0.4
23	886.68	3.8	2.28	1598	149.47	0.08	0.03	10	0.4
24	785.91	3.366	2.0196	1599	132.48	0.08	0.03	10	0.4
25	342.50	1.466	0.8796	1600	57.73	0.08	0.03	10	0.4
26	716.76	3.066	1.8396	1601	120.82	0.08	0.03	10	0.4
27	526.32	2.25	1.35	1602	88.72	0.08	0.03	10	0.4
28	795.83	3.4	2.04	1603	134.15876 9	0.08	0.03	10	0.4
29	405.89	1.733	1.0398	1604	68.424172 3	0.08	0.03	10	0.4
30	609.34	2.6	1.56	1605	102.72	0.08	0.03	10	0.4
31	245.06	1.045	0.627	1606	41.31	0.08	0.03	10	0.4

Tabla 22. Producción de biogás con los sólidos volátiles suspendidos de los lodos de retorno. Datos de la

PITARNL Octubre del 2012

Anexo6. *Fotografías de la PITAR Nuevo Laredo.*



Fotografía 1. Cárcamo de llegada



Fotografía 2. Remoción de basura



Fotografía 3. Barra transportadora



Fotografía 4. Rejillas de remoción de arena



Fotografía 5. Zanjas de oxidación con y sin aireación



Fotografía 6. Zanjas de oxidación sin aireación



Fotografía 7. Zanjas de oxidación momento de aireación



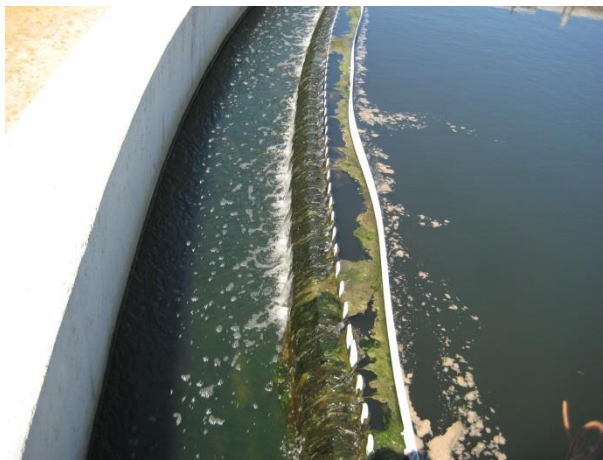
Fotografía 8. Clarificadores



Fotografía 9. Ingreso del caudal a los clarificadores



Fotografía 10. Materia flotante en los clarificadores



Fotografía 11. Desbordamiento del efluente en los clarificadores



Fotografía 12. Estación de cloración



Fotografía 13. Tanque de contacto de cloro



Fotografía 14. Salida del efluente



Fotografía 15. Digestión de lodos en el tanque de retención de lodos.



Fotografía 16. Lodos digeridos



Fotografía 17. Sedimentación de los lodos digeridos



Fotografía 18. Lechos de secado



Fotografía 19. Lodos secos, después de 15-21 días según condiciones climatológicas



Fotografía 20. Recolección manual de lodos secos



Fotografía 21. Lodo seco



Fotografía 22. Recolección de lodos, manualmente



Fotografía 23. Lechos de secado sin lodo



Última página

Perla Alejandra Blanco Jara

Dirección: Carretera Fresnillo-Valparaíso Km 5.5, Rancho San Vicente, Fresnillo, Zacatecas. CP.

Correo Electrónico: pablancajara@hotmail.com.

