

TRABAJO FINAL
CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN LAS APLICACIONES
TECNOLÓGICAS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE IRRADIACIÓN LIMPIAS PARA REMEDIACIÓN AMBIENTAL

Revisión bibliográfica y principales hallazgos

Mgtr. Atencio Soraya

Director: Mgtr. Arambarri Germán

Co-Director: Mgtr. Carsen Andrés

Diciembre 2022

Comisión Nacional de Energía Atómica
Instituto Balseiro
Universidad de Buenos Aires

Inventario 24687
08/02/2023
Biblioteca Leo Falicov

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Balseiro, a la Universidad de Buenos Aires, y a la Comisión Nacional de Energía Atómica, por darme la oportunidad de conocer a fondo este mundo de las aplicaciones tecnológicas de la energía nuclear.

A Dioxitek S.A. y ACUMAR por permitirme realizar este trabajo.

A mis directores: Germán, por su acompañamiento incansable y excelentes consejos, y a Andrés, por permitirme hacer el trabajo a mi manera.

A Verónica Voght de la Gerencia de Aplicaciones y Tecnologías de las Radiaciones de CNEA, Cristian Valls de Nuclearis y a Celina Horak de la IAEA, por escuchar esta propuesta y brindarme información valiosa con la que pude completar este trabajo.

A mis compañeros de la carrera con quienes conviví, los que están y ya no están, que saben cuán arduo fue el camino y cuánto realmente vale llegar a esta meta.

A Camila, mi compañera de carrera y hogar, a quien aprendí a admirar.

A mi familia, mi mamá, mi hermano y mi madrina, por acompañarme a distancia y siempre estar dispuestos a escuchar.

A mis amigos de toda la vida, que cerca o a distancia siempre están.

A mi papá que sembró una semilla que sigue creciendo y dando frutos.

Y por último, pero nunca menos importante, a mí, por siempre buscar crecer en todos los sentidos.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó una revisión bibliográfica sobre las diferentes industrias que apostaron por las tecnologías de irradiación como tratamiento de efluentes y en base a ello se realizó una propuesta de una planta que sería posible implementar dentro del territorio argentino aprovechando los recursos y capacidades disponibles.

Se estudiaron las aplicaciones tanto en efluentes líquidos, lodos y gaseosos; en industrias comerciales y de servicios. Existen registros de que países como Alemania, China, India, Rusia y Polonia utilizan esta tecnología desde los años 70. Se observó también que las empresas que optan por este tipo de tecnología, las usan en complemento con otras tradicionales para mejorar la eficiencia del proceso.

Basándose en las experiencias previas de otras empresas y en las necesidades de la Cuenca Matanza Riachuelo, considerando la tecnología y recursos disponibles en el país se propuso la instalación de una planta de irradiación de lodos provenientes de las plantas de tratamiento de efluentes municipales.

La planta de irradiación sería de CLASE I, diseñada en el país, y utilizaría fuentes de cobalto-60 reutilizadas de otras empresas para aprovechar la actividad remanente de las fuentes que han cumplido su primer ciclo de vida. Las fuentes que permiten reciclar el cobalto-60 han sido diseñadas, construidas y ensayadas por Dioxitek y aprobadas por la ARN, y se caracterizan por tener un menor costo que las fuentes fabricadas con cobalto fresco. Al finalizar la irradiación de los lodos se adicionaría una solución de nitrato de amonio al 60%, proveniente de la planta de producción de dióxido de uranio de la planta de Córdoba de Dioxitek. Este producto final de lodo irradiado más nitrato de amonio, por su alto contenido de materia orgánica y nitrógeno, resulta ideal para ser utilizado como fertilizante.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable del país aprobó la “Norma técnica para el manejo sustentable de barros y biosólidos generados en plantas depuradoras de efluentes líquidos cloacales y mixtos cloacales-industriales” que establece los criterios para el manejo, tratamiento, utilización, disposición o eliminación de los barros o biosólidos resultantes de las diferentes operaciones unitarias que realicen plantas depuradoras de efluentes líquidos cloacales y mixtos, para asegurar una gestión sustentable de los mismos. En esta norma se clasifican a los lodos irradiados como “Biosólidos de clase A” y establece formas de uso de los mismos, entre ellas, se permite la elaboración de abonos que es el objetivo final del trabajo.

Las grandes ventajas de este proyecto incluyen: la generación de un subproducto aprovechable a partir de efluentes municipales, el aprovechamiento de un producto secundario de la planta de Dioxitek (Córdoba), y finalmente, la contribución directa e indirecta con al menos 10 de los 17 los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras Clave: Irradiación de efluentes, energía nuclear y medioambiente.

ÍNDICE

Agradecimientos	1
Resumen	2
Índice	3
1. Introducción	4
1.1 Objetivo General.....	4
1.2 Objetivos Específicos	4
2. Las Empresas	6
2.1 DIOXITEK S.A.	6
2.2 Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR)	6
3. El Problema: ¿Contra qué nos enfrentamos?	9
3.1 Normativa vigente.....	10
3.1.1 ODS	11
3.2 ¿Qué podemos hacer para combatirlo?.....	12
3.2.1 ¿Por qué utilizar la radiación?	12
3.2.2 ¿Como puedo irradiar?	14
4. Plantas de Irradiación de Efluentes Existentes	16
4.1 Efluentes Líquidos	16
4.1.1 Efluentes industriales.....	16
4.1.2 Efluentes municipales y lodos.....	21
4.2 Efluentes gaseosos	28
5. La Propuesta	30
5.1 ¿Por qué?.....	30
5.1.1 Barros irradiados como fertilizantes	30
5.1.2 ODS con los que contribuye el proyecto	31
5.2 ¿Dónde?.....	33
5.3 ¿Cómo?.....	34
5.4 ¿Cuánto?.....	34
6. Conclusiones	36
7. Bibliografía	37

1. INTRODUCCIÓN

La Autoridad de la Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) es el organismo público que se desempeña como autoridad en materia ambiental en el territorio comprendido por la Cuenca Matanza Riachuelo, se encarga de coordinar y dirigir la política ambiental de la Cuenca, atendiendo así la preocupante situación del Río Matanza Riachuelo y su entorno. Sobre la cuenca se encuentran ubicadas grandes industrias que generan efluentes que requieren ser tratados apropiadamente para poder ser vertidos. Es así como Dioxitek se ofrece para presentar una oferta innovadora en el país, utilizando la tecnología y el conocimiento disponible en el territorio, la irradiación.

Las aplicaciones tecnológicas de la ciencia y tecnología nucleares en diferentes sectores han demostrado su fiabilidad y sostenibilidad durante décadas, respaldando diversas necesidades de la civilización humana, desde la generación de energía hasta aplicaciones industriales, médicas y ambientales.

Según la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), las tecnologías de irradiación han demostrado ser eficaces para el tratamiento de contaminantes presentes en efluentes de diferentes tipos de industrias en sus diferentes formas, sólida, líquida y gaseosa. También actualmente se está buscando aplicar este tipo de tratamiento a residuos plásticos para mejorar su degradación obteniendo resultados prometedores.

En el presente trabajo se busca demostrar la confiabilidad de la irradiación como tratamiento de efluentes mediante la descripción de experiencias concretas tanto a nivel nacional como internacional. Finalmente se expone una propuesta que procura generar un beneficio ambiental aprovechando de la mejor forma posible los recursos disponibles.

Por último, es necesario recordar que *“las aplicaciones ambientales son una contribución económica para el medio ambiente y no se tratan de procesos rentables en sí mismo”*, así lo planteo Bumsoo Han, del Departamento de Ciencias Aplicadas de la IAEA (Agencia Internacional de Energía Atómica) en el IMRP20, Bangkok.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Relevar la información existente a nivel nacional, regional e internacional, en lo que respecta a la utilización de las tecnologías de irradiación como una forma eficaz para el tratamiento de efluentes gaseosos, líquidos y barros provenientes de plantas de tratamiento.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Presentar una síntesis de la información antecedente a nivel nacional e internacional de experiencias concretas, de las principales tecnologías de irradiación limpias, aplicadas para el tratamiento de contaminantes presentes en efluentes gaseosos, líquidos y barros además de suelos contaminados.
- Evaluar la aplicabilidad de las tecnologías de irradiación para cumplir con las regulaciones actuales establecidas para el ámbito de la Cuenca Matanza Riachuelo.

- Evaluar la aplicabilidad de las tecnologías de irradiación limpias para la degradación de contaminantes emergentes.
- Indicar los principales hallazgos y para qué tipo de matrices es recomendable su utilización en términos de beneficios ambientales en lo que respecta a la disminución de la carga microbiológica y de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

2. LAS EMPRESAS

2.1 DIOXITEK S.A.

Esta empresa se dedica a generar polvo de dióxido de uranio y a producir fuentes selladas de cobalto-60. Mientras que el polvo de dióxido de uranio se utiliza para producir elementos combustibles que abastecen a las centrales nucleares; las fuentes selladas se utilizan para preservar alimentos, esterilizar insumos quirúrgicos de uso médico, tratar residuos hospitalarios patogénicos y enfermedades cancerígenas.

Fue creada por el Poder Ejecutivo nacional en 1996 y puesta en marcha en 1997. Actualmente la Secretaria de Energía ejerce la titularidad del 51% del Capital Social, el 48% pertenece a la Comisión Nacional de Energía Atómica y el Gobierno de la Provincia de Mendoza es titular del 1% restante.

La empresa está comprometida a ser un ejemplo de la gestión íntegra y transparente con una cultura organizacional en la que la seguridad integral y el cuidado del medioambiente son una prioridad; utilizando con eficiencia y austeridad los recursos disponibles maximizando el valor económico y social. Se orienta a satisfacer las necesidades de los clientes, promoviendo el trabajo en equipo y profesionalismo en un ambiente de trabajo ameno y cordial. (DIOXITEK, 2022)



Figura 1. Logo institucional DIOXITEK S.A. Fuente: (DIOXITEK, 2022).

2.2 AUTORIDAD DE CUENCA MATANZA RIACHUELO (ACUMAR)

Es un organismo público que se desempeña como autoridad en materia ambiental en el territorio comprendido por la Cuenca Matanza Riachuelo, que abarca catorce municipios de la provincia de Buenos Aires y parte de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, donde habitan más de 4 millones de personas, con una alta densidad poblacional (Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo, 2022).



Figura 2. Logo institucional acumar. Fuente: (Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo, 2022)

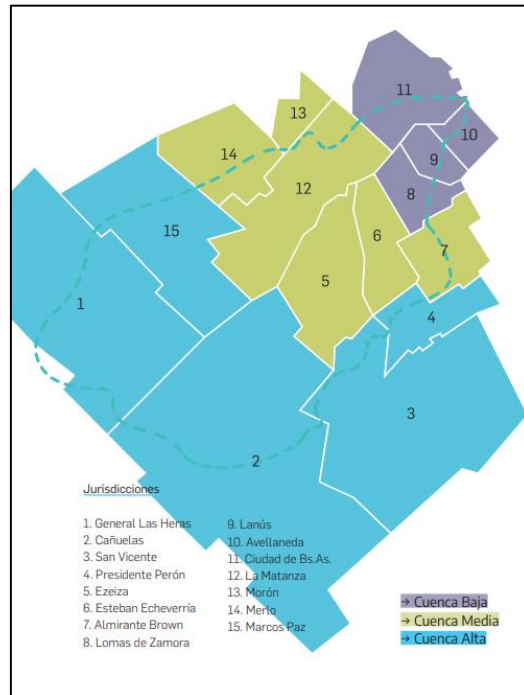


Figura 3. Jurisdicción de la Cuenca Matanza Riachuelo. Fuente: (Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo, 2022)

La cuenca se trata de la zona más urbanizada e industrializada del país, incluyendo zonas que se dedican a actividades agropecuarias. Cada una de estas actividades generan impactos en el ambiente que requieren una correcta gestión. Actualmente, las principales fuentes de contaminación son:

- **Efluentes industriales:** provenientes de aquellas industrias que vierten sus desechos con escaso o nulo tratamiento.
- **Efluentes cloacales:** vertidos de líquidos cloacales con tratamiento escaso o nulo, desagües clandestinos y viviendas no conectadas a la red cloacal que utilizan cámaras sépticas y pozos de infiltración.
- **Residuos sólidos:** provenientes de actividades que se desarrollan en el territorio y constituyen otra fuente de contaminación debido a su incorrecta disposición.

El vertido de aguas residuales, tanto industriales como cloacales, sin el correcto tratamiento acarrea consecuencias para:

- La salud de las personas: por la exposición a los contaminantes presentes en el agua, en los baños, aseo o consumo, en el riego de alimentos o en zonas de esparcimiento cercanas a cuerpos de agua superficial contaminada, acarreado consigo el riesgo de contraer enfermedades
- Ambiente: las aguas residuales y efluentes líquidos no tratados degradan los ecosistemas acuáticos, incluso hasta su desaparición, se generan olores desagradables, se producen gases tóxicos, eutrofización, entre otras.
- Económicas: los cuerpos de agua superficial contaminada perjudican el desarrollo de la región, el aprovechamiento de las zonas para actividades recreativas o turísticas como el uso del agua para otros fines incluso industriales o agropecuarios, aumento del gasto público en el tratamiento de las enfermedades derivadas, reducción del precio de las propiedades cercanas, etc.

Todos estos impactos se pueden prevenir a través de acciones concretas, y es por esto que desde el año 2009 ACUMAR diseñó el Plan Integral de Saneamiento Ambiental (PISA), el cual fue rediseñado en el 2016 y que guía el trabajo del organismo, contemplando un abordaje integral y definiendo acciones para alcanzar tres objetivos:

- Mejorar la calidad de vida en la Cuenca.
- Recomponer el ambiente en todos sus componentes (agua, aire y suelo).
- Prevenir daños con suficiente y razonable grado de predicción (Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo, 2022).

3. EL PROBLEMA: ¿CONTRA QUÉ NOS ENFRENTAMOS?

La Cuenca Matanza Riachuelo cuenta con un importante número de empresas y actividades, para distinguir a aquellas que vuelcan efluentes líquidos que no cumplen con la normativa vigente para el vertido de efluentes se las ha identificado como “Agentes Contaminantes”.

En un trabajo previo realizado entre ACUMAR y la Universidad Nacional de San Martín se han distinguido los sectores que contaminan la cuenca, que son las industrias: frigoríficas, químicas, alimenticias/graseras, curtiembres, galvanoplásticas, metalúrgicas, establecimientos de servicios y conjuntos habitacionales. En el trabajo se separaron los impactos en tres dimensiones: residuos sólidos, emisiones gaseosas y efluentes líquidos, denotando el nivel de impacto con colores: verde los de menor impacto, amarillo medio y rojo como impacto considerable (Vinculación y Transferencia Tecnológica del 3ia-UNSAM, 2021).

Tabla 1. Características del impacto ambiental en cada dimensión. Fuente: (Vinculación y Transferencia Tecnológica del 3ia-UNSAM, 2021)

Características			
Residuos sólidos, semisólidos y/o líquidos	No genera residuos en el proceso industrial	Genera residuos no especiales en el proceso industrial	Genera residuos especiales en el proceso industrial
Efluentes líquidos	No genera en el proceso industrial	Genera efluentes líquidos sin necesidad de tratamiento previo a su vuelco	Genera efluentes líquidos con necesidad de tratamiento previo a su vuelco
Emisiones gaseosas	No genera en el proceso industrial	Genera gases de combustión de gas natural y/o vapor de agua	Genera emisiones con componentes distintos a la combustión del gas natural y/ al vapor de agua

En función del análisis de los procesos productivos de los sectores de interés se identificaron las características del impacto ambiental en las dimensiones preestablecidas con su color correspondiente como se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de las características del impacto ambiental de cada sector de interés. Fuente: (Vinculación y Transferencia Tecnológica del 3ia-UNSAM, 2021)

Sector	Subsector	Residuos Sólidos, SemiSólidos y/o Líquidos	Emisiones Gaseosas	Efluentes Líquidos
Alimenticia	Galletas, bizcochos y alfajores	Alto	Alto	Alto
	Quesos	Alto	Alto	Alto
	Helados	Alto	Alto	Alto
	Gaseosas, jugos y aguas	Alto	Alto	Alto
	Licores	Alto	Alto	Alto
	Cerveza	Alto	Alto	Alto
Cárnica	Mataderos y Frigoríficos	Alto	Alto	Alto
	Fiabres y embutidos	Alto	Alto	Alto
	Aceites y grasas	Alto	Alto	Alto
Curtiembres		Alto	Alto	Alto
Química	Farmacéutica	Alto	Alto	Alto
	Pinturas y barnices	Alto	Alto	Alto
	Cosmética	Alto	Alto	Alto
Galvanoplastia		Alto	Alto	Alto
Metalúrgica	Fundición de metales	Alto	Alto	Alto
	Procesos de conformado	Alto	Alto	Alto
	Fabricación de productos metálicos	Alto	Alto	Alto
Establecimientos de servicio	Lavaderos de autos	Alto	Alto	Alto
	Lavanderías/Tintorerías	Alto	Alto	Alto
	Estaciones de servicio	Alto	Alto	Alto
Conjuntos habitacionales		Alto	Medio	Alto

Como puede observarse en la Tabla 2, en todos los sectores analizados los efluentes líquidos entran en la clasificación de impacto considerable requiriendo tratamiento antes de ser vertidos respetando las normativas vigentes. Algunos sectores no generan residuos sólidos especiales, pero en la mayoría de los casos sí lo hacen. En todos los casos debe hacerse un manejo de residuos sólidos con su correspondiente disposición controlada y acorde a la legislación. Finalmente, para el caso de las emisiones gaseosas, el comportamiento vario más entre las diferentes categorías.

El presente análisis es ilustrativo, ya que en las operaciones reales hay grandes diferencias entre sectores y entre establecimientos. Es importante destacar que no todos los Agentes Contaminantes causan el mismo impacto en el ambiente, sino que son unos pocos los que generan cerca del 80% de la contaminación presente en la cuenca.

3.1 NORMATIVA VIGENTE

En la Cuenca coexisten diferentes legislaciones para definir, controlar y remediar el recurso hídrico de la zona, estableciendo límites de concentración para distintos parámetros que pueden estar presentes en los desagües cloacales y efluentes industriales. Los entes involucrados son ACUMAR de carácter interjurisdiccional, Autoridad del Agua (ADA) de la Provincia de Buenos Aires, la empresa pública de Agua y Saneamientos Argentinos (AySA) y la Agencia de Protección Ambiental (APRA) de la Ciudad de Buenos Aires, entre otras. Estas entidades establecen límites de concentración para parámetros de efluentes líquidos en función del lugar de disposición.

En el Anexo A de la Resolución 283-2019 de ACUMAR se establece que los efluentes líquidos deben cumplir con dos criterios, el primero marca los parámetros regulados que deben estar por debajo de los límites establecidos por la Resolución y, en segundo lugar, se establece la carga másica de vertido que debe ser menor o igual a la carga másica límite de vertido.

3.1.1 ODS

La Agenda 2030, adoptada en 2015, comprende 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible y sus 169 metas correspondientes, cuya finalidad es estimular la acción en esferas de importancia crítica para la humanidad y el planeta durante los próximos 15 años. Estos Objetivos y metas son de carácter integrado e indivisible y conjugan de manera equilibrada las tres dimensiones del desarrollo sostenible: económica, social y ambiental. En la Figura 4 se encuentran listados los objetivos



Figura 4. Objetivos de desarrollo sostenible

Numerosos países recurren a la ciencia y la tecnología nucleares para contribuir a sus objetivos de desarrollo y poder cumplirlos en ámbitos como la energía, la salud humana, la producción de alimentos, la gestión del agua y la protección del medio ambiente. Según la IAEA, el uso de estas técnicas contribuye de manera directa con 9 de los 17 ODS que se encuentran descriptos en la Figura 5.



Figura 5. Objetivos de desarrollo sostenible en los cuales la energía nuclear contribuye de manera directa.

3.2 ¿QUÉ PODEMOS HACER PARA COMBATIRLO?

La creciente conciencia sobre el impacto que genera la incorrecta disposición de los residuos y las legislaciones cada vez más exigentes para su regulación han estimulado la búsqueda de nuevos métodos de disposición de los residuos generados, el mejor resultado siempre es su reciclado luego de un tratamiento apropiado.

Los Procesos Avanzados de Oxidación (AOPs) son nuevas tecnologías utilizadas para destruir contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en diferentes tipos de efluentes. Su funcionamiento se basa en la creación de especies altamente reactivas que interaccionan con las moléculas contaminantes presentes y las descomponen para formar otras moléculas más pequeñas y no tóxicas. Esto representa una ventaja con respecto a las formas actuales de remoción de los mismos debido a que en ellos simplemente se los transfiere a otro medio implicando que luego deba ser tratado.

La irradiación de cualquier sistema lleva a la formación de especies altamente reactivas, como ser radicales o iones de hidrógeno que pueden desencadenar la descomposición de los contaminantes y además, actuar como esterilizantes en el medio que se trabaja. Estas características la vuelven muy versátil para eliminar una gran variedad de contaminantes y microorganismos que pueden afectar directa o indirectamente a la población.

3.2.1 ¿Por qué utilizar la radiación?

La radiación es generada por el decaimiento de un átomo excitado a un estado de menor energía y por ende más estable, esta desexcitación puede ser en forma de onda (rayos X o gamma) o partículas (neutrones, electrones o partículas alfa compuestas de protones y neutrones).

Por su alta energía, tiene la capacidad de romper enlaces moleculares y ionizar átomos y su gran ventaja es que esta energía no llega a ser la suficiente como para inducir la radiactividad en los productos irradiados.

Ventajas de la irradiación:

- Puede reducir patógenos: bacterias (por ejemplo, la salmonella), virus (por ejemplo, polio virus) y parásitos.
- Puede oxidar contaminantes orgánicos tóxicos y peligrosos y convertir sustancias no biodegradables en sustancias fácilmente degradables por los microorganismos.
- Elimina olores.
- Facilita la deshidratación y mejora la biodegradabilidad.
- Hace factible la reutilización de barros como fertilizante: siendo este muy bueno para las plantas además de reducir el costo de la disposición final y ser una potencial fuente de ingreso.
- Es relativamente simple, eficiente y confiable. (Jianlong, 2007).

Existen dos conceptos que son fundamentalmente importantes en la química de la radiación. Una es la dosis absorbida, que describe la cantidad de energía depositada en el material expuesto a la radiación ionizante. Formalmente, la dosis absorbida puede ser definida como la cantidad de energía absorbida dividida por la masa del material

irradiado. El sistema Internacional (SI) describe la dosis absorbida con la unidad Grey (Gy) que equivale a 1 Joule/kg (Jianlong, 2007).

El otro concepto importante en la química de la radiación es el valor "G" que mide el rendimiento radioquímico por la cantidad de especies creadas en una sustancia luego de ser irradiada por 100 eV de energía absorbida de radiación ionizante (Jianlong, 2007).

3.2.1.1. *La radiación y los microorganismos*

La acción de la radiación en los organismos vivos puede ser dividida en efectos directos e indirectos, si la radiación interactúa con la cadena de ADN o algún otro componente celular crítico para la supervivencia de la célula, este se considera un efecto directo, lo cual puede afectar a la habilidad de la célula de reproducirse y sobrevivir. En el caso de que la radiación interactúe con el agua circundante y se produzca la radiólisis de la misma, se liberarán radicales muy reactivos que serán los responsables de atacar estas moléculas importantes para su supervivencia y se considerará que el efecto fue indirecto. En el caso de los lodos, por ejemplo, el efecto indirecto es más significativo que el directo por la elevada concentración de agua en la mezcla (Jianlong, 2007).

Ambos efectos, directos e indirectos afectan a la célula causando su muerte lo que lo hace adecuado para la desinfección. Aunque la sensibilidad de los microorganismos a la radiación varía significativamente de una especie a otra, la mayoría de las investigaciones señala que con una dosis absorbida de entre 2-4kGy es posible lograr una desinfección segura del efluente tratado (Jianlong, 2007).

Comparado con otras opciones usualmente utilizadas para la desinfección de efluentes, como la pasteurización, tratamientos aerobios, compostaje, incineración, acondicionamiento térmico y almacenamiento prolongado, la radiación ionizante se lleva a cabo a temperatura ambiente y no requiere tanta energía, posee además una huella de carbono pequeña y es capaz de eliminar eficientemente los patógenos y parásitos en corto tiempo. También se debe resaltar que no es necesario el uso de químicos extras para este proceso, significando una reducción del costo de operación. Finalmente, esta tecnología es compatible con las plantas de tratamiento existentes, ya que el proceso de irradiación puede ser instalado al final del tratamiento, un paso antes de su disposición final (Jianlong, 2007).

Las aplicaciones ambientales de la radiación ionizante han sido estudiadas ampliamente, siendo Lowe et al. (1956) los primeros en investigar la purificación del agua utilizando una fuente de Co-60, logrando una inactivación de los microorganismos presentes y concluyendo que la radiación gamma puede ser utilizada para destruir los microorganismos presentes en agua y desechos líquidos (Lowe, 1956).

3.2.1.2. *La radiación y los contaminantes orgánicos*

Los barros provenientes de las plantas de tratamiento de efluentes se caracterizan por la presencia de altas concentraciones de materia orgánica y compuestos no biodegradables como pesticidas, herbicidas, etc.

Los efectos de la radiación ionizante sobre los contaminantes orgánicos han sido ampliamente estudiados durante los últimos años, y mediante esto ha sido demostrado que la radiación es un método efectivo para oxidar los contaminantes orgánicos (Jianlong, 2007).

3.2.1.3. *Otros efectos*

La radiación ionizante también afecta a los sólidos en suspensión, la reología de la solución y la estabilización anaeróbica.

3.2.2 ¿Como puedo irradiar?

Actualmente, existen dos opciones ampliamente difundidas que se pueden utilizar para el proceso de irradiación de efluentes, la primera es la irradiación gamma y la otra son los aceleradores de electrones. Ambos son considerados equivalentes para una dada dosis de radiación.

Según un estudio realizado entre la Asociación Internacional de Irradiación (IIA) y la Alianza de la Industria de Procesamiento Gamma (GIPA), en el mundo el uso de las diferentes tecnologías de irradiación para la esterilización de insumos médicos se distribuye como se muestra en la Figura 6 (GIPA/IIA, 2017).

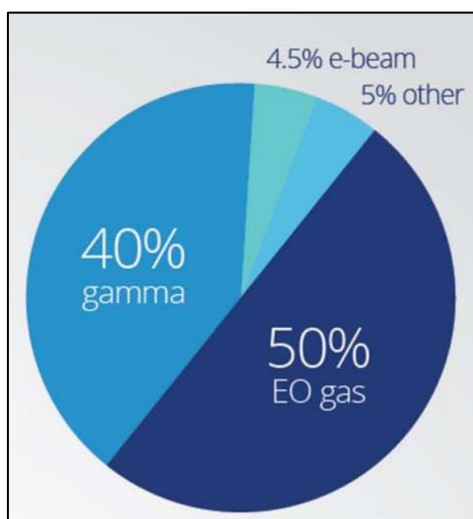


Figura 6. Volumen de esterilización por tecnología. Fuente: (GIPA/IIA, 2017)

Finalmente, el método de irradiación seleccionado dependerá principalmente del costo, de la disponibilidad de la tecnología en la zona y del personal calificado para manejarlo y de las características del efluente a tratar.

3.2.2.1. *Radiación gamma*

Las fuentes utilizadas en general son el cesio-137 y el cobalto-60, ambas generan rayos gamma que pueden ser utilizados para la irradiación de efluente, aunque la más comúnmente utilizada industrialmente es la fuente de cobalto, debido a que es más eficiente por producir dos tipos de rayos gamma de diferentes y elevadas energías, tiene una vida media de 5,26 años (Lessel, 1997).

Por su parte el Cs-137 tiene una vida media de 30 años, pero a diferencia del Co-60 produce solo un tipo de rayo gamma y de menor energía, además la sal en la que se lo suele encontrar es muy soluble, lo que restringe su aplicación debido a que podría generar problemas serios en el caso de que se infiltre agua u ocurra algún tipo de accidente (Lessel, 1997).

Los rayos gamma se caracterizan por tener buena penetración, tanto en agua como en lodos, la penetración promedio del Co-60 es de 28cm en agua mientras que en lodos es de no menos de 25cm; y en el caso de Cs-137 la penetración promedio es de 24cm en agua (Lessel, 1997).

3.2.2.2. *Haces de electrones (Electron Beam)*

Los haces de electrones son generados en aceleradores, los cuales aceleran las partículas cargadas en una dirección a través de campos eléctricos y magnéticos en vacío. Este tipo de máquinas en general se clasifica de acuerdo a la energía que posee el haz. Su poder de penetración es de 3mm/MeV en agua, y en el caso de los lodos es aún menor. Su ventaja radica en la ausencia de una fuente radiactiva lo que facilita las condiciones de seguridad además de que puede ser encendido y apagado a demanda, lo que es particularmente bueno en el caso de que se deba realizarse algún tipo de mantenimiento de emergencia (Jianlong, 2007).

3.2.2.3. *Rayos X*

Si bien los rayos X se han utilizado hace tiempo, la esterilización mediante este tipo de irradiación es relativamente nueva. Para generarlos se utiliza un acelerador de electrones que hace colisionar las partículas cargadas con un “blanco” y, como producto de la colisión, se libera energía en forma de rayos X. Si bien su penetración es mejor que la de los rayos gamma y mucho mejor que la de los electrones acelerados, la eficiencia de conversión es muy baja en comparación, lo que lo hace un proceso muy caro (GIPA/IIA, 2017).

4. PLANTAS DE IRRADIACIÓN DE EFLUENTES EXISTENTES

El crecimiento de la población, la urbanización, la calidad de vida y las actividades industriales han contribuido a la degradación del ambiente y de manera proporcional, pero más lenta, se han investigado y desarrollado formas para mitigarlo.

Los primeros estudios en el tratamiento de desechos con radiación ionizante, predominantemente para su desinfección, fueron llevados a cabo en los años 50. Hoy día, la radiación se estudia y utiliza para:

- Tratamiento de aguas superficiales y subterráneas.
- Purificación de aguas residuales industriales.
- Tratamiento de lodos.
- Purificación de efluentes gaseosos.
- Tratamiento de residuos sólidos: hospitalarios, aeroportuarios, suelos contaminados, degradación de plásticos, etc.

A continuación, se mencionan ejemplos de industrias que han elegido utilizar procesos de irradiación para mejorar la calidad ambiental de sus efluentes a disponer.

4.1 EFLUENTES LÍQUIDOS

Durante los últimos años, la irradiación de efluentes ha sido implementada por muchas industrias a lo largo del mundo para enfrentar los problemas de contaminación causado por la incorrecta disposición de efluentes.

Los procesos de irradiación pueden ser una alternativa atractiva para tratar efluentes líquidos de diferentes tipos de industrias, debido a que logra descomponer una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos resultando en la desinfección, desodorización y decoloración. A su vez, da la posibilidad de trabajar de manera directa o indirecta en combinación con otros procesos convencionales para mejorar el rendimiento tecnológico y económico.

4.1.1 Efluentes industriales

Los efluentes industriales se caracterizan por tener una gran variedad y elevada concentración de contaminantes, además de que su verdadera composición suele ser desconocida. Todos estos factores hacen que su tratamiento sea dificultoso.

El nivel de contaminación es usualmente caracterizado por la demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO), que especifican la cantidad de oxígeno necesario para oxidar completamente de manera química o biológica los compuestos orgánicos presentes en la muestra respectivamente; así como también por los compuestos orgánicos totales y carbono disuelto que especifican la cantidad de carbono que se encuentra presente en los contaminantes o en la totalidad de la muestra respectivamente. Evidentemente cuanto mayor sean estos parámetros, mayor es la concentración de los contaminantes orgánicos presentes en el efluente.

La gestión y tratamiento de los efluentes industriales no suelen ser sencillos, debido a la naturaleza de difícil biodegradación de sus componentes, los procesos convencionales de tratamiento resultan insuficientes o inadecuados para los mismos, es por esto que es necesario recurrir a procesos de oxidación avanzados (AOPs) como ser la radiación ionizante.

En el tratamiento de aguas residuales con radiación ionizante se inducen modificaciones químicas que, en dosis absorbidas suficientemente altas, pueden dar lugar a la descomposición completa de los contaminantes allí presentes. En condiciones reales, es decir, con una concentración alta y variable de contaminante y una dosis económicamente aceptable, se produce una descomposición parcial de los mismos lo que resulta en la mejora de las etapas de purificación posteriores, aumentando la eficiencia del proceso total gracias a la etapa de irradiación (Woods, 1994).

A continuación, se mencionan algunos ejemplos de industrias que han invertido en esta tecnología:

- En 1974 en Múnich se construyó una planta piloto para tratar un máximo de 30m³ por día con una dosis de 3kGy. Se utilizó principalmente para investigar los efectos de la irradiación gamma para la destrucción de compuestos químicos en aguas residuales industriales. Sus operaciones cesaron en 1985 (Lessel, 1997).

- Operando desde 1984 una planta que combina el proceso biológico con la irradiación con electrones se encuentra en Voronezh, Rusia. Empleando un acelerador de electrones, se dedica a eliminar Nekal, un emulsificante utilizado en procesos de fabricación de goma sintética, que es tóxico y no biodegradable, y cuyos efluentes en los que estaba presente eran depositados por inyección en la tierra, resultando en una contaminación del agua subterránea causando enfermedades por el consumo de la misma en la población cercana. La irradiación con bajas dosis sumada a la aireación con ozono y el tratamiento biológico lograron una purificación del 99.5%. Actualmente la purificación del agua subterránea es casi completa (Cooper, 2004).

- Desde 1988 se encuentra operando el Centro de Investigación de Haces de Electrones en Miami (EBRF), esta institución cuenta con uno de los aceleradores más grandes del mundo en operación, y desde esa fecha se encuentra investigando el proceso de irradiación en diferentes tipos de efluentes. Puede trabajar en continuo o por lotes, irradiando un área de 122x7.6cm del agua contaminada que cae en cascada, la dosis absorbida se determina midiendo el aumento de temperatura de la misma (Cooper, 2004).

- En 1992 el Instituto de investigación de energía nuclear en Brasil, comenzó a operar una planta piloto de irradiación utilizando un acelerador de electrones. Su rango de operación varía entre 500KeV y 1.5 MeV y con este se han investigado el tratamiento de aguas residuales industriales, municipales y de consumo. Con los resultados obtenidos buscan ser ejemplo e inspirar a las industrias individuales y/o parques industriales a implementar esta tecnología como alternativa a los tratamientos convencionales de efluentes. En dicha institución, también buscan diseñar una planta móvil de irradiación, que se utilizaría para demostrar la eficiencia del proceso en el lugar donde se implementaría y de esa manera promoverlo (Rela, 2008).

- En 1998, se construyó en el Complejo Industrial de Teñido de Daegu (DDIC), Corea, una planta piloto para tratar 1000m³ por día de agua residual de una planta de teñido con e-beam. Los trabajos realizados en ella han resultado en la decoloración y destrucción de los compuestos orgánicos, en una reducción apreciable en el consumo

de reactivos químicos, reducción en el tiempo de tratamiento, y en un aumento del límite de caudal en la instalación del 30-40%. (B. Han, 2005).

➤ En el 2005, gracias a los datos obtenidos de la planta piloto se construyó una planta localizada en el mismo complejo (DDIC) , con una capacidad de 10.000m³ de agua residual por día, utilizando un acelerador de electrones de 1MeV y 400kW que trabaja en conjunto con los bio-tratamientos que allí se encuentran (B. Han, 2005).

➤ En marzo del 2017 se inauguró en China la primera planta de irradiación con e-beams para tratar aguas residuales de plantas textiles con alta concentración de tinturas. La planta, ubicada a 300km al sur de Shangai puede tratar 1500 m³ de agua por día. En este tipo de efluentes, el trabajo de las bacterias no es suficiente para degradar las tinturas, las cuales están compuestas de cadenas grandes, largas y complejas que no son fáciles de degradar biológicamente. Al irradiar los efluentes se generan radicales libres de vida corta, que interactúan con estos compuestos complejos y logran descomponerlos en moléculas más pequeñas que posteriormente podrán ser tratadas por procesos biológicos convencionales. (Miklos, 2017)



Figura 7. Tecnología e-beam utilizada para irradiar agua residual de industria textil. Fuente: (Miklos, 2017)

➤ En junio de 2020 se inauguró en China la planta de irradiación de efluentes industriales más grande del mundo que utiliza la tecnología de electron beam.



Figura 8. Planta de irradiación de efluentes industriales con e-beam. Fuente: (Liou C. W., 2021)

El productor de telas más grande del mundo, Guanhua Knitting Factory en la ciudad de Jiangmen, en el sur de Chin, opera una planta de tratamiento que utiliza la tecnología

de haces de electrones para tratar el agua contaminada con residuos de tintas industriales, almidones, ácidos, sales y detergentes cuyas moléculas son difíciles de descomponer con bacterias. Con 7 aceleradores de electrones trabajando juntos, las moléculas largas y complejas se descomponen mediante una corriente de electrones de alta energía dando como resultado un agua que puede ser reutilizable. La instalación logra tratar más de 30.000 toneladas de aguas residuales por día (Willis, 2020).



Figura 9. Muestras de los efluentes industriales textiles pre y post tratamiento. Fuente: (Willis, 2020)

➤ En mayo del 2021 comenzó a funcionar la primera planta de irradiación de aguas residuales médicas en China. Utilizando la tecnología e-beam, la misma es capaz de tratar 400 m³ por día. Se encuentra ubicada en la provincia de Hubei y además de esterilizar el agua residual puede descomponer antibióticos sin el uso de desinfectantes extras o productos secundarios indeseados. Tradicionalmente, el tratamiento de este tipo de aguas residuales incluye procesos de filtración, biológicos y químicos; que fácilmente generan productos secundarios y además, no degradan los antibióticos.

En un trabajo conjunto entre la Autoridad de Energía Atómica de China (CAEA), expertos de la Universidad Tsinghua y la Corporación General de Energía Nuclear de China combinaron de manera exitosa la tecnología de irradiación e-beam junto con el proceso de esterilización, lo que resultó en un equipo acelerador de electrones autoblandado, manufacturado específicamente para irradiar agua residual médica. La calidad de las aguas residuales tratadas ha superado el estándar chino para la disposición de las mismas. (Liou J. , 2021)



Figura 10. Acelerador de electrones autoblandado utilizado para irradiar efluentes médicos. Fuente: (Liou J., 2021)

4.1.1.1. *Investigaciones que lo avalan*

Takács, Wojnárovits & Pálfi (2007) estudiaron la cinética y el mecanismo de destrucción de dos tintas de uso comercial (Apollofix Red & Reactive Black 5) en solución acuosa diluida. Llegaron a la conclusión de que los mismos pueden descomponerse de manera efectiva mediante los productos reactivos de la radiólisis inducida por la radiación. También notaron que la dependencia de la dosis con la desaparición del color es lineal o logarítmica, dependiendo de que producto de radiólisis se analice, considerando que las moléculas presentes en las tintas tienen una alta reactividad con los oxidrilos.

Muneer, Bhatti, Bhatti & Rehman (2011) estudiaron la influencia de diferentes dosis de radiación gamma, utilizando una fuente de Co-60, en combinación con H_2O_2 en aguas residuales de industrias que trabajan con tintes, las cuales se encontraban muy contaminadas en términos de intensidad de color y valores de demanda química de oxígeno (DQO). Con este estudio se demostró que el tratamiento con radiación de alta energía es bueno para la eliminación de la intensidad del color, así como para la reducción de la DQO, y que en presencia de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es aún mejor. Además de tratarse de un método seguro y respetuoso con el medio ambiente, no se requiere ningún tratamiento posterior para la gestión de los lodos y el agua tratada puede ser utilizada para la agricultura o reutilización industrial.

Preocupados por la contaminación generada por un parque industrial en Pakistán, Hina et al. investigaron el drenaje principal del mismo en diferentes puntos, tomaron muestras y analizaron la variación de pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, sólidos en suspensión, DBO y DQO de las mismas luego de ser expuestas a una fuente de Co-60. Las muestras presentaron grandes diferencias de un punto a otro. En el análisis previo a la radiación, algunos de estos parámetros dieron fuera del rango permitido por la legislación local, sin embargo, todos demostraron una evolución positiva luego del tratamiento con irradiación, y, por tanto, todos se encontraron dentro del rango establecido. Destacaron que no se realizó ningún otro proceso ni tratamiento previo y/o posterior a la irradiación, y que en el caso de buscar obtener los mismos resultados químicamente, serían necesarios procesos, aditivos y químicos aumentando exponencialmente su costo además de la producción de productos secundarios indeseados (Hina, 2021).

4.1.2 Efluentes municipales y lodos

Los efluentes municipales son generados en los hogares, comúnmente conocidos como aguas negras. Se encuentran compuestos principalmente por agua y un muy pequeño porcentaje de sólidos orgánicos e inorgánicos y pueden tener en menor concentración químicos, fármacos, insecticidas, pesticidas y/o metales pesados, que, aunque en el gran volumen que se encuentran disueltos no resultan significativos, deben ser controlados y correctamente dispuestos.

Este tipo de efluente es tratado y luego devuelto a grandes cuerpos de agua. En las plantas, los componentes sólidos y líquidos son separados mediante tratamientos primarios (físicos) y secundarios (biológicos). Los tratamientos secundarios incluyen una etapa de digestión aeróbica, que se realiza mediante el crecimiento de microorganismos selectos en presencia de oxígeno, mediante esto, la materia orgánica es descompuesta en moléculas más simples, como subproducto de esta etapa se genera un lodo que es difícil de disponer, debido a que puede contener una gran carga de microorganismos infecciosos. Los métodos tradicionales de disposición final de los mismos incluyen la incineración, vertido oceánico y rellenos sanitarios pero estos métodos son limitados por el espacio que ocupan, su costo y su impacto ambiental. Es por esto que algunas comunidades han cambiado la disposición final por una de reciclaje de los barros.

El reciclaje de barros es una opción viable, debido a que al aplicarlos al suelo le proveen a este macro y micronutrientes que mejoran sus propiedades físicas y le aumenta la materia orgánica presente, lo que repercute en una mejora en la productividad de los cultivos y ayuda a restaurar la vitalidad de la tierra donde se incorporan.

Para aquellos que poseen plantas de tratamiento de efluentes representa un subproducto con valor agregado en lugar de un segundo efluente que debe ser tratado posteriormente. Es por esto que el reciclado de los lodos en aplicaciones de agricultura puede resultar en una actividad que proteja a humanos, animales y el medio ambiente.

Gracias a años de investigaciones, algunas industrias ya han adoptado la radiación ionizante como una alternativa prometedora por su alta eficiencia en la inactivación de microorganismos patógenos, oxidación de contaminantes orgánicos, eliminación de olores desagradables y otras características que facilitan los procesos posteriores al tratamiento, además de no precisar químicos adicionales, no producir subproductos que deban ser tratados y de que es económicamente atractiva.

➤ En 1973 comenzó a operar el primer irradiador utilizado para la desinfección de lodos, ubicado en Geiselbullach, Alemania. La planta fue diseñada para tratar 180m³ de lodos del tratamiento anaeróbico. En la Figura 11 se puede notar que dos de los componentes de la planta se encontraban bajo tierra, la cámara de irradiación con un tubo central que contenía las fuentes y la bomba de recirculación, para asegurar la distribución homogénea, además de las tuberías y válvulas correspondientes. A nivel del suelo se encontraba el silo, el equipamiento de control, una grúa y el laboratorio.

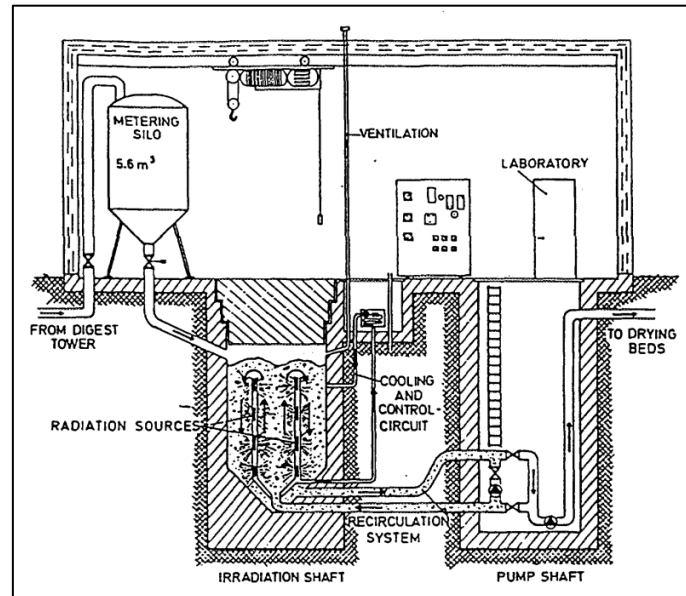


Figura 11. Esquema de la planta de irradiación. Fuente: (Lessel, 1997)

El irradiador operaba por lotes, tratando aproximadamente 6m^3 de efluentes con un contenido de menos de 5% de sólidos y una dosis absorbida de 3kGy . Luego de ingresar a la cámara de irradiación el lote permanecía allí dentro por un tiempo predeterminado que variaba con la actividad disponible y la dosis requerida, luego de esto se proseguía con la evacuación. La operación por lotes se realizaba automáticamente las 24hs del día, y todas las bombas, válvulas, indicadores y equipos de control se encontraban o en zonas accesibles permanentemente cerca de la bomba de recirculación en el subsuelo o sobre la tierra por lo cual, todos los servicios e inspecciones se podían realizar en cualquier momento sin la necesidad de precauciones especiales.

La planta dejó de operar en 1993 debido a que durante una parada de mantenimiento surgieron nuevas leyes en Alemania que prohibieron el uso de los efluentes municipales como fertilizante por la presencia de metales pesados en ellos (Lessel, 1997) (Lavale, 1997).

➤ En 1976 en Boston, Estados Unidos, se puso en marcha una planta piloto de demostración para el tratamiento de aguas municipales. El acelerador de electrones tenía una potencia de 50kW , la capacidad de la planta fue de 400m^3 por día y una dosis de 4kGy . Se realizaron test haciendo pasar finas capas de no más de 2mm de espesor por debajo del haz de electrones. No obstante, estas investigaciones fueron únicamente a escala laboratorio sin llegar a escalarse. Finalizaron su operación en 1984.

➤ En 1979 se construyó una planta piloto para el tratamiento de barros provenientes de plantas de tratamientos de efluentes municipales, mezclados con otros residuos sólidos, en Albuquerque, Estados Unidos. Fue diseñado para operar con fuentes de Cs-137 con una actividad de 1000kCi . La capacidad instalada era de 8 toneladas por día de barro (con un 50% de sólidos) cargados en canastos alrededor de las fuentes, la dosis requerida era de 10kGy . La planta cesó sus actividades en 1986 (Lessel, 1997).

➤ En 1991 la empresa Nordon de Canadá inició las tratativas para construir una planta de irradiación de lodos con una fuente de cobalto-60. La instalación contaría con una zona de irradiación, y una zona de secado del lodo mezclado con chips de madera para acelerar el proceso. Finalmente, aunque el costo y la eficiencia de producción eran

óptimos, el gobierno optó por continuar con el tratamiento que utilizaban anteriormente (Swinwood, J.F., Fraser, F.M., 1993) (Swinwood, J.F., Fraser, F.M., 1995).

➤ En 1994 comenzó a trabajar el Irradiador de Investigación de Higienización de Lodos (SHRI) en Vadodara India, la planta fue el resultado del trabajo conjunto entre el Centro Atómico de Investigación de Bhabha (BARC) y la Municipalidad de Vadodara, para tratar 110 m³ de barros municipales. Estos barros, que contienen un 96% de agua y un 4% de compuestos sólidos y acarrean microorganismos patógenos son higienizados por radiación gamma de alta energía proveniente de una fuente de cobalto-60, el proceso se ilustra en la Figura 12. Este es un proceso simple, donde el único parámetro es la dosis absorbida, que debe ser constantemente optimizada y asegurada. El efluente líquido ingresa a la vasija de irradiación y es recirculado ininterrumpidamente en un ciclo cerrado por un tiempo preestablecido para alcanzar la dosis deseada. Tras años de estudios se llegó a la conclusión de que la dosis necesaria para desactivar el 99,99% de los microorganismos patógenos es de 3kGy. También se llegó a la conclusión de que la planta puede ser adoptada sin mayores precauciones por cualquier planta de tratamiento de efluentes para la etapa terciaria de desinfección (Government of India Department of Atomic Energy, 2022) (Naresh Kumar, 2020).

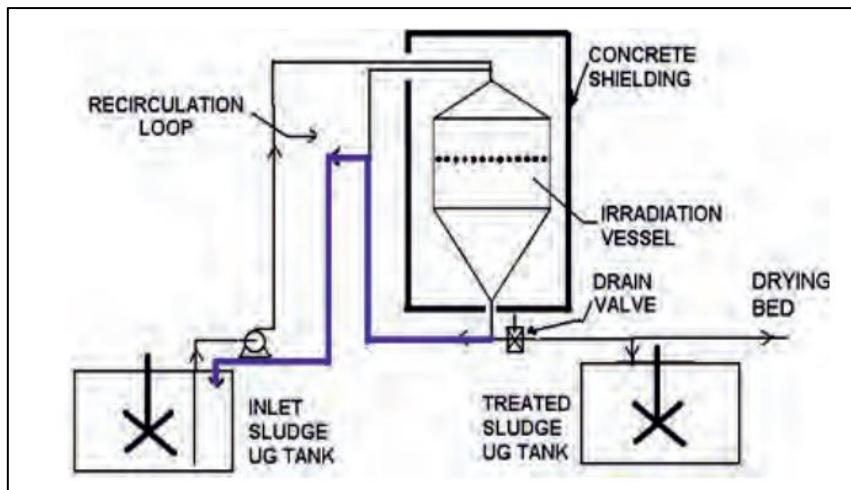


Figura 12. Planta SHRI de irradiación de lodos. Fuente: (Naresh Kumar, 2020).

Estudios paralelos han demostrado que estos lodos, luego de ser tratados pueden ser utilizados efectivamente no solo como fertilizante, sino que también es bueno para mejorar la calidad del suelo a largo plazo, reflejándose en una disminución de costos en agroquímicos y fertilizantes (Naresh Kumar, 2020).

➤ En 1997 en Rusia, en una planta piloto se estudió la factibilidad de utilizar un pequeño acelerador (15kW) de electrones para producir un haz de electrones de baja energía (0,3 MeV) y costo para purificar aguas municipales de un pueblo pequeño. La planta contaba con la capacidad de purificar 500m³ por día y tenía una distribución como se observa en la Figura 13.

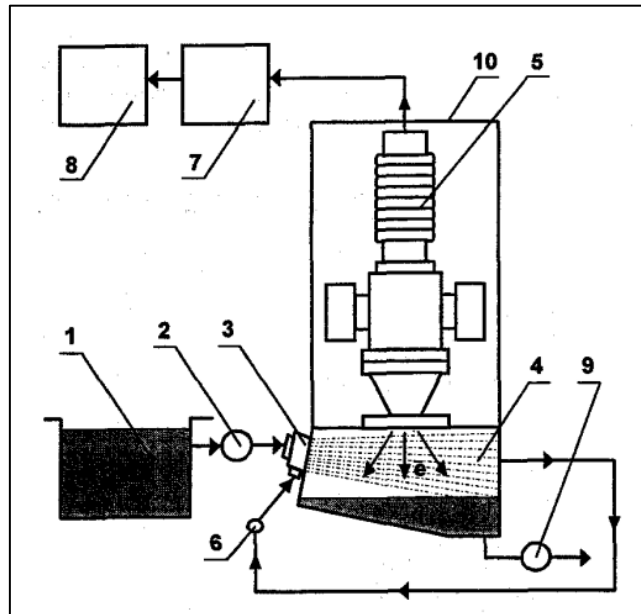


Figura 13. Esquema de la planta piloto de irradiación de aerosol. Referencias: (1) Reservorio de agua residual municipal, (2) Bomba de transporte, (3) Unidad de spray, (4) Cámara de irradiación, (5) Acelerador de electrones, (6) Inyección de aire, (7) Suministro eléctrico, (8) Panel de control, (9) Bomba de extracción de agua desinfectada, (10) Escudo biológico. Fuente: (Pikaev, 1997)

El proceso consiste en pulverizar el agua residual e irradiarla con un haz de electrones en presencia de ozono. Los resultados de este estudio demostraron que es posible purificar el agua municipal residual con este método para ciudades pequeñas (Pikaev, 1997). Estudios posteriores evaluaron el comportamiento del color, DBO, DQO, microorganismos totales, olor, concentración de contaminantes, etc., y determinó que la dosis requerida para obtener resultados dentro de los parámetros buscados no superaba los 5kGy (Podzorova, 1998).

➤ En 1998 se esperaba comience a operar la Planta Irradiadora de Barros (PIBA) en la ciudad de Tucumán, Argentina. La planta fue diseñada por la Comisión Nacional de Energía Atómica, y se esperaba que los barros luego de ser irradiados se utilizaran como fertilizante en las plantaciones de la zona. La planta tenía una superficie total de 200m², una capacidad de tratar un caudal máximo de 180m³/día de barros con una concentración de sólidos de entre 8 y 10% trabajando por lotes de 6m³ cada 30 minutos con recirculación para lograr la homogeneidad. Las dosis necesarias para conseguir una desinfección del 99% era de 3kGy o de 2kGy en el caso de utilizar aireación dentro del tanque. Se utilizarían fuentes de cobalto-60 nuevas, alcanzando una actividad máxima de 700.000Ci.

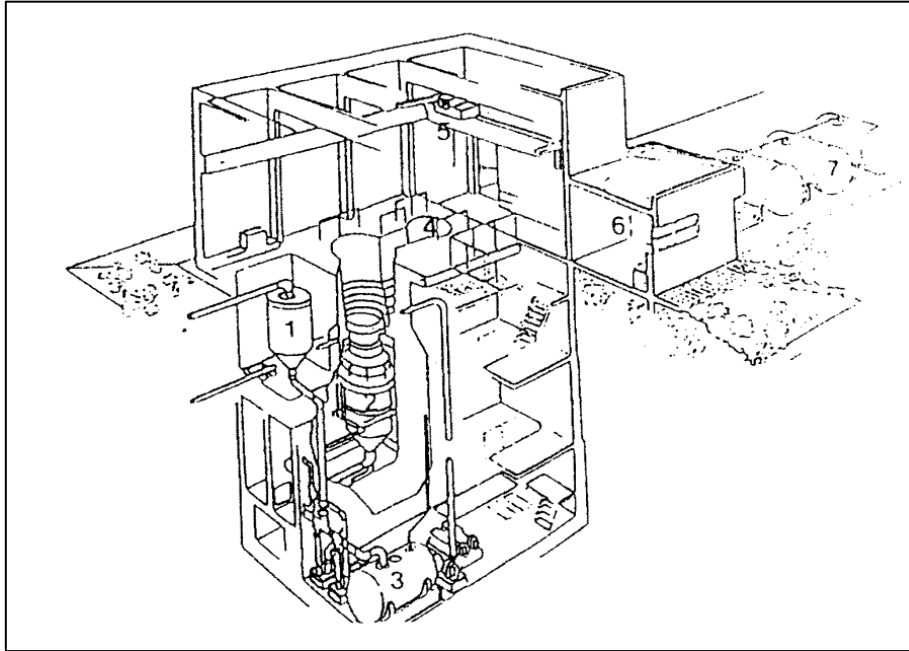


Figura 14. Esquema de la instalación. (1) Tanque de admisión, (2) Tanque de irradiación, (3) Tanque de salida, (4) pozo de transferencia, (5) Grúa de transporte, (6) Laboratorio, (7) Tanques de almacenamiento de agua desmineralizada. Fuente: (Graño J. , 2001)

En la Figura 14 se puede observar un esquema de la distribución de la planta. El tanque de irradiación estaría hecho de acero inoxidable, de 3m de alto y 1,6m de diámetro, los lodos ingresarían por la parte superior y egresarían por gravedad por la parte inferior (Graño J. M., 1998). Sin embargo, el proyecto no se concretó.

➤ En 2019, luego del exitoso trabajo realizado en SHRI se procedió a construir una segunda planta de irradiación de lodos. Asentada en Ahmedabad, la misma tiene la capacidad de convertir 100 toneladas por día de barro seco en fertilizante que luego de ser irradiado con cobalto-60 es vendido a los agricultores. Esta planta es el resultado de la colaboración conjunta entre la Municipalidad de Ahmedabad, como respuesta al elevado crecimiento poblacional, y el Centro Atómico de Investigación de Bhabha (BARC), quien provee el soporte técnico y científico para llevar adelante este proyecto (Sharma, 2017) (Naresh Kumar, 2020).

La caja de barro seco es expuesta a 64hs de 150kCi de radiación gamma, durante este tiempo los patógenos presentes son eliminados, se degradan los químicos presentes, se eliminan las malas hierbas, se reduce el olor y permite que en este medio se inoculen microorganismos útiles para obtener biofertilizante que proveerán de carbono orgánico y otros nutrientes al suelo. (Kaushik, 2019)

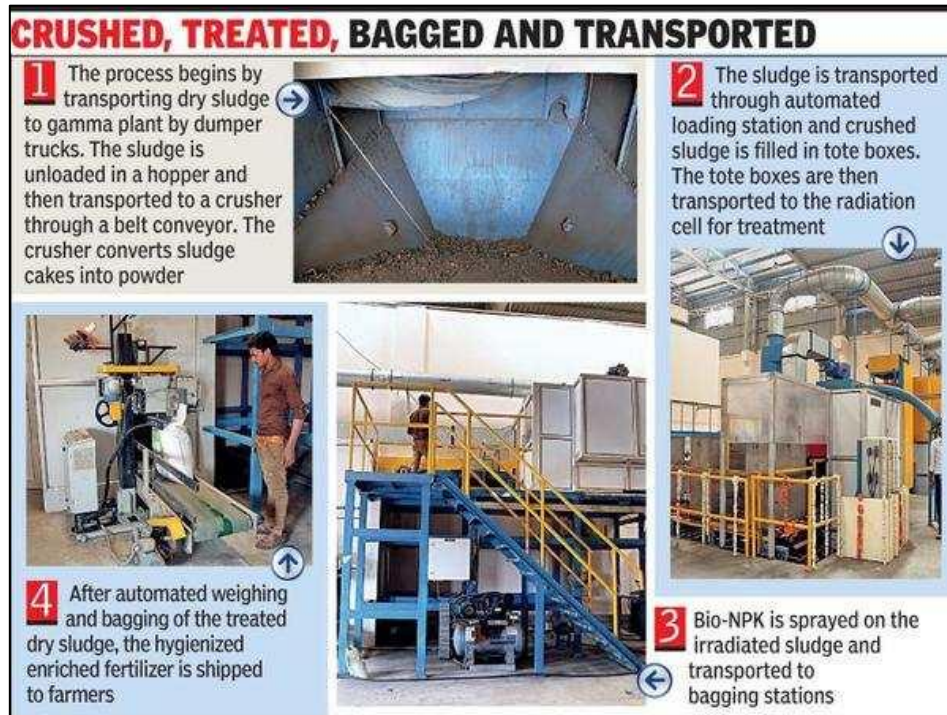


Figura 15. Proceso de tratamiento del barro seco. Fuente: (Kaushik, 2019)

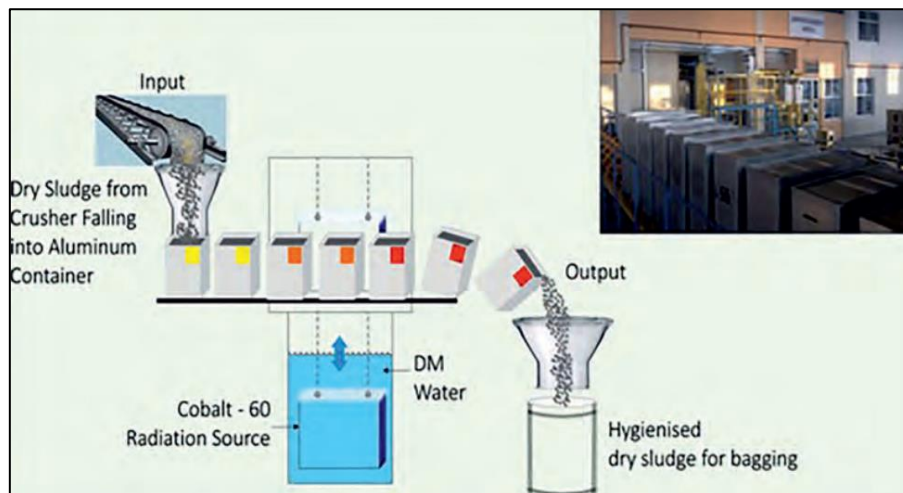


Figura 16. Esquema del proceso de irradiación. Fuente: (Naresh Kumar, 2020)

➤ Durante el 2022, siguiendo el ejemplo de la planta en Ahmedabad, la ciudad de Indore, también en India, se encuentra preparando una instalación similar para irradiar los barros de la zona de Kabitkhtedi. La misma tendrá la capacidad de tratar 20 de las 50 toneladas de barros generadas diariamente allí. (TNN, 2022)

4.1.2.1. Investigaciones que lo avalan

En (1994) Süß A. investigó la variación de las propiedades del suelo luego de la aplicación de lodos irradiados como fertilizante. El trabajo se realizó en diferentes zonas de Bavaria (Alemania), y los resultados demostraron que el alto contenido de nutrientes y materia orgánica de los lodos de depuradora los convierte en una enmienda del suelo útil para los agricultores. La aplicación de lodos de depuradora, con una tasa de 130 m³/ha, resultó en rendimientos de maíz similares o superiores a la aplicación equivalente

(en términos de N) de fertilizantes químicos. Las altas tasas de lodos (800 m³/ha) aumentan aún más el rendimiento de los cultivos, aunque resultan poco prácticos para su uso en el campo. También se observó un efecto beneficioso residual de la aplicación de lodos de depuradora en el rendimiento de cebada posterior. La aplicación de lodos también mejoró las propiedades biológicas y físicas del suelo (Süss, 1994).

En (1997) Hung et al., realizaron una evaluación de la presencia de metales pesados, fenoles y microorganismos en los efluentes municipales de la ciudad de Hanoi (Vietnam) y su variación luego de ser irradiados. Los resultados mostraron que los desechos municipales por su alto contenido de materia orgánica y su desinfección serían apropiados para ser utilizados como portadores de biofertilizantes. Se esperaba que los desechos irradiados e inoculados pudieran almacenarse durante un largo periodo de tiempo antes de que los microorganismos y hongos contaminantes pudieran recuperarse. (Hung, 1997)

En (2010) Tahri et al., estudiaron los efectos de la radiación gamma de una fuente de Co-60 sobre muestras recolectadas de la planta de tratamiento de efluentes urbanos de Tétouan (Marruecos). Eligieron utilizar la radiación gamma, debido a que el desempeño de la radiación UV y β es limitado por su incapacidad de inactivar ciertas partículas o agregados de microorganismos y su corta penetración en efluentes con alto contenido de partículas en suspensión. Mientras que, por su parte, la radiación gamma ha demostrado su eficacia para el tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad de inactivación de los microorganismos asociados con partículas, similar a la inactivación de los microorganismos libres. Los resultados obtenidos indicaron que la radiación gamma es efectiva para tratar las aguas negras municipales, no solo por la eliminación total de la flora bacteriana, coliformes fecales y totales y la reducción de la DBO₅ y DQO, lo que mejora las propiedades del agua, sino también por mantener los nutrientes (NPK) allí presentes, haciéndola apta para su utilización como fertilizante (Tahri, 2010).

En (2015) se comparó la eficiencia de diferentes procesos de desinfección, siendo estos UV, ozono y radiación gamma ionizante proveniente de una fuente de Co-60. Se notó que la desinfección con UV muestra una variación estacional muy marcada debido a la variación de las características del efluente, por su concentración de sólidos en suspensión, temperatura y precipitación, dando como resultado que al menos un 90% de los microorganismos siguieran con vida luego del tratamiento con su consecuente rebrote. En cambio, la radiación ionizante mostró una eficiencia estable, con una eficiencia de desinfección superior al 95% del conteo de colonias totales, totalmente indiferente al cambio estacional, demostrando también una prohibición del rebrote de colonias. En este estudio también se comparó el consumo eléctrico de las diferentes técnicas, demostrando que los métodos de desinfección con UV u Ozono requirieron de dos a tres órdenes de magnitud más que el de radiación ionizante (Lee, 2015).

Se han estudiado las ventajas adicionales que trae la irradiación de barros para ser utilizados en la agricultura. Además de la eliminación de los microorganismos patógenos, la irradiación descompone los pesticidas que allí se encuentran, mejora la disponibilidad del nitrógeno para ser fácilmente absorbido por las plantas, inhibe las semillas para evitar la aparición de hierbas indeseadas y finalmente, disminuye la viscosidad de la mezcla para facilitar su transporte y bombeo durante su aplicación y manejo (Magnavacca, 2002)

4.2 EFLUENTES GASEOSOS

Los efluentes gaseosos que contienen Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC) e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH) son emitidos por las industrias que utilizan solventes, de automóviles y aquellas que contienen procesos de incineración. Su liberación no controlada ha generado diversos impactos negativos en el medio ambiente como la lluvia ácida. Los procesos de remoción de estos compuestos de las corrientes gaseosas que existen en la actualidad son la incineración, absorción y modos biológicos. En general con estos se logran alcanzar las concentraciones límites de emisión, pero presentan algunos problemas, los procesos suelen ser caros, la energía que consumen es elevada y el subproducto que se genera en el caso de la absorción deriva en otro efluente que debe ser tratado. Debido a esto se ha investigado la radiación ionizante con haces de electrones como una alternativa para suplir esta necesidad (Paur, 1997). Este método ha demostrado ser efectivo y eficiente para la remoción de estos compuestos además de que en el tratamiento de efluentes gaseosos que contienen SO_2 y NO_x se obtiene como subproducto sulfato y nitrato de amonio. Estas sales pueden usarse como fertilizantes enriquecedores del suelo, y análisis de diferentes plantas pilotos que utilizan esta tecnología, han probado que no contienen sustancias nocivas como metales pesados y cumplen con todos los estándares establecidos para los fertilizantes comerciales (Chmielewski A. T., 1997).

➤ Una planta piloto fue construida en la Central Eléctrica Kaweczyn (Polonia) donde dos aceleradores de electrones fueron instalados en serie para aplicar una irradiación de gas en cascada por primera vez. En la Figura 17 se presenta un esquema simple de la planta. Este tratamiento se aplicó para remover los NO_x y SO_x de las corrientes gaseosas de salida de la planta (Chmielewski A. , 1997).

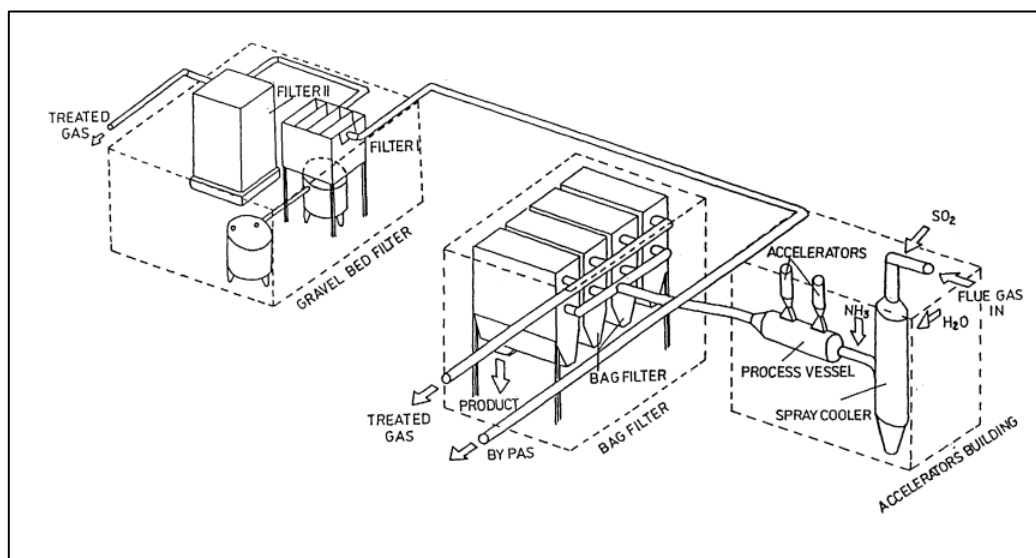


Figura 17. Esquema de la planta piloto. Fuente: (Chmielewski A. , 1997)

➤ La corporación Ebara en Japón construyó una planta de desulfuración en la central generadora de Seito. La planta trata gases con un 2% de azufre, con un caudal de $300.000\text{Nm}^3/\text{h}$ y una dosis de $3,2\text{ kGy}$ que aseguran una remoción del 80% del SO_2 y un 10% de NO_x . Para lograr esto, se instalaron dos aceleradores de electrones de igual potencia. El subproducto generado es de 2470 kg/h y se utiliza como fertilizante (Chmielewski A. , 1997).

➤ Luego de años de investigaciones a escala laboratorio y piloto, se diseñó la planta de tratamiento de gases para la central eléctrica de Pomorzany (Polonia), con un flujo de 270.000 Nm³/h tratados con dos aceleradores de electrones de alta potencia permiten una reducción del 80% de NO_x y de un 70% de SO₂, produciendo un subproducto a 800kg/h (Chmielewski A. , 1997).

5. LA PROPUESTA

Luego de analizar las experiencias previas concretas de otras industrias y las problemáticas que serían ideales atacar dentro de la cuenca, considerando la tecnología y recursos disponibles en el país se propone: una planta de irradiación de efluentes municipales con radiación gamma de fuentes de cobalto-60 reutilizadas para su desinfección y posterior uso como fertilizante adicionando nitrato de amonio, subproducto proveniente de la planta de producción de dióxido de uranio de la empresa Dioxitek.

El tratamiento de irradiación no presenta efectos adversos en los valores nutricionales de los lodos, y es por esto que las aplicaciones de los lodos irradiados al suelo para devolver a este los nutrientes y componentes orgánicos es una estrategia ideal de manejo de los efluentes a disponer. Además, como ya lo han hecho otras empresas, los sistemas de irradiación son generalmente construidos dentro de la misma planta de tratamiento de efluentes convencional, con el único propósito de desinfectar los mismos. Estos pueden ser diseñados para operar por lotes o de manera continua.

5.1 ¿POR QUÉ?

Las ventajas son incontables, pero se pueden mencionar:

- Es una tecnología ampliamente utilizada alrededor del mundo.
- En el país se tiene el conocimiento técnico y tecnológico.
- Las fuentes de cobalto-60 tendrán un menor costo debido a que son reutilizadas.
- Permite el uso de un subproducto valioso de la planta de DIOXITEK de Córdoba.
- Permite atacar a un Agente Contaminante importante de la Cuenca.
- Logra eliminar patógenos, degradar productos químicos, reducir el olor y coloración y evita la aparición de hierbas indeseadas.
- Disminuye la viscosidad de la mezcla, facilitando su transporte y bombeo durante su aplicación y manejo.
- Contribuye de manera directa e indirecta con los ODS.
- Implementa la economía circular.
- Senta un precedente para el resto del país.

5.1.1 **Barros irradiados como fertilizantes**

En 1994 se realizó en Viena un congreso donde se expusieron los diferentes puntos de vista con respecto al uso de barros irradiados como fertilizantes. Las conclusiones fueron las siguientes:

La aplicación de los lodos irradiados incrementa la eficiencia de los suelos de cultivo, mejorando la cantidad de materia orgánica disponible para las plantas, la capacidad de intercambio de cationes, retención de humedad y fertilidad. Debido a las altas concentraciones de nitrógeno, fósforo y micronutrientes, los barros se convierten en excelentes fertilizantes. Sin embargo, es necesario asegurarse de que los microorganismos patógenos sean totalmente eliminados, que la concentración de metales pesados sea menor a la permitidas, y que las concentraciones ya presentes en

el suelo más las adicionadas en los barros no superen dichos límites, y también es necesario controlar la presencia de contaminantes orgánicos (IAEA, 1994).

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable del país, en su Resolución 410/2018 aprueba la “Norma técnica para el manejo sustentable de barros y biosólidos generados en plantas depuradoras de efluentes líquidos cloacales y mixtos cloacales-industriales” que tiene por objeto establecer los criterios para el manejo, tratamiento, utilización, disposición o eliminación de los barros y biosólidos resultantes de las diferentes operaciones unitarias que realicen plantas depuradoras de efluentes líquidos cloacales y mixtos (cloacales-industriales), a efectos de asegurar una gestión sustentable de los mismos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2018).

Según esta Norma, los lodos irradiados se clasifican como “BIOSÓLIDOS DE CLASE A”, ya que se encuentra sometido a un proceso destinado a reducir fuertemente su nivel de patogenicidad y su capacidad de atracción de vectores. De todas formas, después de irradiar se deberá controlar la reducción de sólidos volátiles y la deflexión de oxígeno para verificar la estabilización, además del nivel de patógenos allí presentes calculando el número más probable (NPM) por gramo de Coliformes fecales y Salmonella. La frecuencia de muestreo también se encuentra estipulada y depende de la cantidad de biosólidos generados. Finalmente, se establecen las formas de uso de los biosólidos de clase A, que pueden ser:

- **Forestación y floricultura:** Como enmienda en plantaciones forestales, ornamentales y viveros. Aplicaciones a parcelas forestadas juveniles o maduras. Reforestación en áreas disturbadas o reservas naturales y para promover el establecimiento de la vegetación.
- **Recuperación de sitios degradados:** En regiones sujetas a estados o grados incipientes de desertificación o pérdida de cobertura vegetal o suelo, derivados de causas naturales o antrópicas. Rehabilitación o mejoramiento de sitios degradados. Rehabilitación de pasivos ambientales.
- **Restauración del paisaje:** En áreas que fueron sometidas a extracción minera, cobertura superficial o relleno de escombreras, canteras, tosqueras agotadas o diques de cola. Elaboración de tecnosoles para relleno o cobertura final en áreas de excavación o en aquellas sujetas a pérdida de suelos superficiales debido a obras de infraestructura. Mejora del paisaje.
- **Elaboración de abonos:** Como insumo en procesos de elaboración de abonos o enmiendas orgánicas a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original
- **Cierre de rellenos sanitarios:** Como cobertura final o bio-coberturas en las acciones de clausura de rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos y en actividades de revegetación de los mismos.
- **Paisajismo:** En la contención de taludes de caminos, rutas nacionales y provinciales. Parquización, jardines públicos y campos deportivos. Creación de hábitats con motivos estéticos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2018).

5.1.2 ODS con los que contribuye el proyecto

Cada uno de los Objetivos posee metas que se buscan cumplir a partir de las diferentes actividades, a continuación, se mencionan las metas que se cumplirían en cada objetivo en el caso de llevarse a cabo el proyecto:

✓ **3) Salud y bienestar:** Una de las metas de este objetivo es poner fin a las muertes evitables, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades causadas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo. La radiación ionizante en dosis suficiente garantiza la eliminación de microorganismos patógenos que podrían causar enfermedades graves además de disminuir en gran medida el impacto negativo de la disposición de los efluentes.

✓ **4) Educación de calidad:** Se busca aumentar sustancialmente el número de jóvenes y adultos que tienen habilidades relevantes, incluidas habilidades técnicas y vocacionales, en el caso de llevarse a cabo el proyecto se deberá formar personal capacitado para trabajar en la planta de irradiación.

✓ **6) Agua limpia y saneamiento:** Las metas especifican que se busca lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo la cantidad de aguas residuales sin tratar y aumentando el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua. El proyecto contribuye directamente al cumplimiento de este objetivo.

✓ **8) Trabajo decente y crecimiento económico:** Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, promoción de políticas orientadas al desarrollo que apoyen las actividades productivas, la creación de puestos de trabajo decentes, el emprendimiento, la creatividad y la innovación, producción y consumo eficientes de los recursos mundiales desvinculando el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, elabora y pone en práctica políticas encaminadas a promover un turismo sostenible que cree puestos de trabajo y promueva la cultura y los productos locales al mejorar la calidad del agua de la Cuenca.

✓ **9) Industria, innovación e infraestructura:** Modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales.

✓ **11) Ciudades y comunidades sostenibles:** reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo.

✓ **12) Producción y consumo responsable:** lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales. Lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente. Reducir la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización. Alentar a las grandes empresas a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes.

✓ **14) Vida submarina:** Si bien la Cuenca es de agua dulce, la misma desemboca en el Mar Argentino, el proyecto busca reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes.

✓ **15) Vida y ecosistemas terrestres:** Velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan.

✓ **17) Alianzas para lograr objetivos:** La alianza entre Acumar, DIOXITEK, CNEA y Nuclearis, es una alianza para el desarrollo sostenible, ya que movilizan e intercambian conocimientos, especialización, tecnología y recursos financieros, aprovechando la experiencia de cada parte involucrada a fin de apoyar el logro de los ODS en un país en vías de desarrollo como es Argentina.

5.2 ¿DÓNDE?

Considerando que tomar la decisión de empezar a mejorar la calidad de los efluentes que son devueltos al medio representa una inversión moderada, es necesario evaluar detalladamente donde sería recomendable emplazarla. ¿Acaso todas las empresas contaminan por igual?

En la Cuenca, uno de los principales Agentes Contaminantes son las plantas de tratamientos de efluentes municipales. Se encuentran instaladas nueve grandes plantas de tratamiento de líquidos cloacales y al menos 35 pequeñas plantas de tratamiento de barrios desvinculados (Rodríguez, R., 2018).

Esta problemática ha sido notada hace tiempo y es por esto que, a finales del 2018, se realizó un estudio de la influencia de la radiación en los lodos obtenidos como efluente luego del tratamiento de líquidos cloacales para considerar el proceso de irradiación como una alternativa para la desinfección de los mismos. El proceso de tratamiento de los líquidos cloacales se resume en la Figura 18 así como también se especifica de donde se tomó la muestra para realizar el análisis.

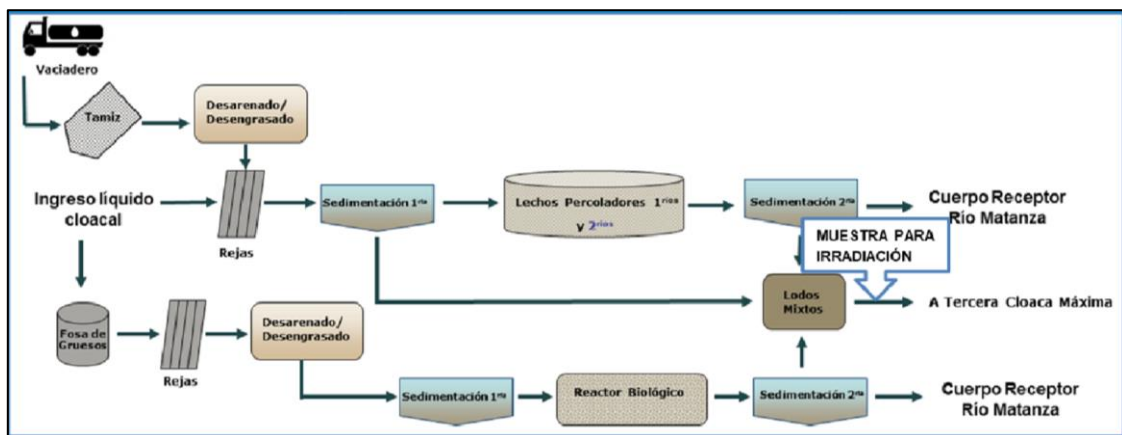


Figura 18. Proceso de tratamiento de efluentes de la empresa AySA. Fuente: (Pachado, 2018)

La irradiación se realizó con una fuente de cobalto-60 que emite radiación gamma en la Planta de Irradiación Semi Industrial (PISI), del Centro Atómico Ezeiza.

Los resultados obtenidos determinaron que el tratamiento con radiación gamma de lodos de sedimentación permitió reducir en un solo paso grupos bacterianos patógenos como coliformes fecales en hasta 5 logaritmos (reducción del 99.99% de la población), y colonias presuntivas de *Salmonella spp.* (reducción del 99%) al tiempo que la absorbancia en el espectro visible como una medida de color se atenuó, con una reducción de hasta el 62% y la DQO, que en los viales de reacción digeridos mantuvieron alrededor de un 60% de la A_{620} con respecto al control (Pachado, 2018).

El caudal y las características fisicoquímicas de los efluentes varían dependiendo de la planta que se trate. Estimativamente, el caudal de una planta de tratamiento de efluentes

produce lodos con un máximo de un 6% de sólidos en suspensión en un caudal que varía entre 165 y 330m³/día entre plantas de mediano y gran porte.

5.3 ¿CÓMO?

- La **planta de irradiación** sería enteramente desarrollada en el país, tratándose de una instalación licenciada CLASE I compuesta por un irradiador gamma operado por personal licenciado bajo estrictos controles de seguridad física.
- Las **fuentes** industriales de cobalto-60 utilizadas en plantas de irradiación, luego de un periodo de uso comprendido entre 3 y 4 veces su vida media, son recibidas por Dioxitek y utilizadas como materia prima de nuevas fuentes industriales. Estas, denominadas FIS 6008, aprovechan la actividad remanente de las fuentes que han cumplido un ciclo de uso (industrial o médico) fueron diseñadas, construidas y ensayadas por Dioxitek y aprobadas por la Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina (ARN).
- De la planta de producción de dióxido de uranio de la planta de DIOXITEK, se genera mensualmente entre 40 y 60m³ de una solución de **nitrate de amonio** (NH₄NO₃) al 60% como subproducto, que se caracteriza por sus propiedades como fertilizante y sería factible adicionarlo al producto final

Siguiendo el ejemplo de las plantas de irradiación de Alemania, India y el proyecto PIBA, se plantea una planta de irradiación por lotes, el proceso seguiría la siguiente secuencia:

Un lote de lodo ingresaría a un recipiente cargado con las fuentes de cobalto-60 y será recirculado dentro de ese recipiente por una bomba de alta capacidad, esta recirculación garantizará la homogeneidad de irradiación del lodo y prevendrá el depósito de las partículas suspendidas que tienden a bloquear pasajes pequeños presentes en el sistema. El periodo de recirculación dentro del recipiente de irradiación dependerá de la actividad de la fuente, a menor actividad, mayor tiempo de residencia para alcanzar la dosis absorbida requerida para alcanzar la desinfección necesaria. Al finalizar la irradiación del lote, el lodo es evacuado del recipiente de irradiación y llevado a otro donde será mezclado con el nitrate de amonio a concentración adecuada para la posterior aplicación en el suelo como fertilizante. Este proceso es repetido con el siguiente lote de lodos. Toda la operación puede ser automatizada para tener la mínima dependencia de personal en el área. La planta deberá contar con un blindaje biológico para proteger a los operarios. (Lavale, 1997).

5.4 ¿CUÁNTO?

La clave para llevar a cabo una aplicación exitosa de las tecnologías de irradiación para la protección ambiental es la economía. Para poder competir con otros procesos tradicionales en términos económicos es necesario: reducir la dosis requerida, mejorar la eficiencia del tratamiento y, en el caso de las plantas que utilizan radiación gamma de fuentes de cobalto-60, trabajar en un proceso de irradiación permanente para garantizar que la actividad contenida en ella no se utilice solo "para calentar agua". En el caso de los lodos el tratamiento es simple, requiere una baja dosis (no mayor a 3kGy) y permite la eliminación de olores, color, y turbiedad; y es por esto que siempre será importante una correcta caracterización del efluente tratado. (IAEA, 2007)

El monto de inversión varía con el tipo de proceso, la actividad con la que se trabaje, la locación, el caudal tratado, y el personal. Sin embargo, analizando trabajos realizados en el país, se puede estimar que una planta de tal envergadura tendría un costo estimado de 8 millones de dólares (Añazco, 2007).

El costo final podría variar significativamente, debido a:

- Se plantea utilizar fuentes recicladas, y la actividad requerida es mucho menor a la planteada por Añazco, no mayor a los 500kCi.
- Se puede obtener un rédito económico por la venta de los fertilizantes obtenidos.
- Se debe considerar que para la empresa DIOXITEK se aportaría un uso estable para el subproducto de la planta de Córdoba. Además le permite garantizar el uso de las fuentes con material reciclado y también es posible darle un uso al material terminado y en guarda hasta su despacho, aprovechando su decaimiento.
- El tamaño de la planta estipulada para la planta de irradiación de efluentes es menor al planteado por Añazco.

6. CONCLUSIONES

Los vastos estudios y experiencias de plantas que aplican la radiación ionizante han demostrado que es una opción económica y eficiente para el tratamiento adecuado de los diferentes efluentes, tanto industriales como municipales.

Sin embargo, se debe considerar que, aunque sea económico en comparación con otros tipos de tratamiento, representa una inversión de gran porte para aquellas empresas que deseen adoptarla. Es por esto que se recomienda atacar inicialmente a aquellos agentes contaminantes que aporten un mayor impacto a la contaminación de la Cuenca, como es el caso de las plantas de tratamiento de efluentes municipales.

AySA es una empresa pública de gestión privada, que utiliza fondos tanto estatales como internacionales, estos aportes internacionales provienen de empresas que se ajustan a normativas de vertido de efluentes aún más exigentes que las presentes en nuestro país, lo que implicaría que tarde o temprano comenzarían a exigir su cumplimiento aquí también. La diferencia de las normas internacionales con las nuestras radica en que en ellas se encuentran reguladas también las concentraciones de contaminantes emergentes, como ser por ejemplo antibióticos, los cuales actualmente ni siquiera son censados en nuestro país. Sin embargo y afortunadamente, estos contaminantes también pueden ser debidamente tratados e inactivados con la tecnología de las radiaciones ionizantes.

Las fuentes podrían ser reutilizadas de otras aplicaciones. Aquellas que hayan cumplido su vida útil dentro de una planta pero que aún posean una actividad considerable, superior a 1000Ci, serían recibidas por la empresa DIOXITEK, debidamente acondicionadas y posteriormente utilizadas como fuente para irradiar los efluentes en la planta.

La IAEA recomienda que los fabricantes de fuentes selladas radioactivas retomen las fuentes producidas por ellos mismos al fin de la vida útil (de la cuna hasta la tumba), es por esto que DIOXITEK propone reutilizarlas para aprovechar su actividad remanente y así cerrar el ciclo como productores de fuentes selladas de cobalto-60.

La empresa DIOXITEK además posee como subproducto de su planta de producción de dióxido de uranio (Córdoba en operación y Formosa en construcción) nitrato de amonio, el mismo podría ser utilizado como aditivo para mejorar las propiedades fertilizantes de los lodos irradiados.

7.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Añazco, J. (Julio de 2007). *Planta de ionización multipropósito*. Buenos Aires.
- Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo. (13 de Octubre de 2022). *Institucional*. Obtenido de acumar: <https://www.acumar.gov.ar/institucional/>
- Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo. (2022). *La cuenca nos une - Anuario 2021*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo.
- B. Han, J. K. (2005). Electron beam treatment of textile dyeing wastewater: operation of pilot plant and industrial plant construction. *Water Science & Technology*, 317-324.
- Chmielewski, A. (1997). Electron Bemas for Power Plant Flue Gas Treatment. En *Radiation technology for conservation of the environment* (págs. 3-30). Zakopane, Poland: International Atomic Energy Agency.
- Chmielewski, A. T. (1997). Collection and Application of By-Product Formed in E-B Flue Gas Treatment Process. En IAEA, *Radiation technology for conservation of the environment* (págs. 31-42). Zakopane, Poland: IAEA.
- Chmielewski, A. Z.-S. (1995). Disinfection of municipal sewage sludges in installation equipped with electron accelerator. *Radiation Physics and Chemistry Vol. 46*, 1071-1074.
- Cooper, W. G. (2004). Radiation Processes. En S. Parsons, *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment* (págs. 209-246). London: IWA Publishing.
- DIOXITEK. (13 de Octubre de 2022). *Nosotros*. Obtenido de DIOXITEK: <https://dioxitek.com.ar/nosotros/>
- Getoff, N. (1989). Advancements of radiation induced degradation of pollutants in drinking and waste water. En *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Applied Radiation and Isotopes*, (págs. 585-594).
- GIPA/IIA. (2017). *A Comparison of Gamma, E-beam, X-ray and ethylene oxide technologies for the industrial sterilization of medical devices and healthcare products*. GIPA/IIA.
- Government of India Department of Atomic Energy. (19 de Octubre de 2022). *Isotope and radiation technology applications for industrial and social benefit*. Obtenido de Bhabha Atomic Research Centre: <https://www.barc.gov.in/pubaware/ind.html>
- Graño, J. (2001). Radiation Technology for Sewage Sludge Treatment: The Argentine Project. En IAEA, *Use of irradiation for chemical and microbial decontamination of water, wastewater and sludge* (págs. 163-177). Vienna: IAEA.

- Graíño, J. M. (1998). Sewage Sludge Irradiation Plant in Argentina. En C. R. Cooper W.J., *Environmental Applications of Ionizing Radiation* (págs. 557-567). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Hina, H. N. (2021). Treatment of industrial wastewater with gamma irradiation for removal of organic load in terms of biological and chemical oxygen demand. *Helyon*, E05972.
- Hung, N. N. (1997). Gamma radiation sterilization of municipal waste for reuse as a carrier for inoculant. En IAEA, *Radiation Technology for Conservation of the Environment* (págs. 331-337). Zakopane, Polonia: IAEA.
- IAEA. (1992). *Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities*. Austria: IAEA Safety Guides.
- IAEA. (1994). *Sewage sludge and wastewater for use in agriculture*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2007). *Radiation processing: Environmental applications*. Vienna: IAEA.
- Jianlong, W. J. (2007). Application of radiation technology to sewage sludge processing: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 2-7.
- Kaushik, H. (3 de Marzo de 2019). *Ahmedabad: Sludge treatment plant is operational now*. Obtenido de Times Of India: <https://timesofindia.indiatimes.com/city/ahmedabad/sludge-treatment-plant-is-operational-now/articleshow/68237506.cms>
- L.A.W. Abdou, O. H.-N. (2011). Comparative Study between the efficiency of electron beam and gamma irradiation for treatment of dye solutions. *Chemical Engineering Journal*, 752-758.
- Lavale, D. S. (1997). Sewage sludge irradiators. En IAEA, *Radiation Technology for Conservation of the Environment* (págs. 289-301). Vienna: IAEA.
- Lee, O. K. (2015). A comparative study of disinfection efficiency and regrowth control of microorganism in secondary wastewater effluent using UV, ozone, and ionizing irradiation process. *Journal of Hazardous Materials*, 201-208.
- Lessel, T. (1997). *Disinfection of sewage sludge by gamma radiation, electron beams and alternative methods*. Vienna: Sewage Sludge and Wastewater for Use in Agriculture.
- Liou, C. W. (19 de Julio de 2021). *China's electron beam technology for treating industrial wastewater*. Obtenido de Nuclear Newswire: <https://www.ans.org/news/article-3073/chinas-electron-beam-technology-for-treating-industrial-wastewater/>
- Liou, J. (11 de Agosto de 2021). *China Opens Asia's First Facility to Treat Medical Wastewater Using Electron Beam Technology*. Obtenido de International Atomic Energy Agency: <https://www.iaea.org/newscenter/news/china-opens-asias-first-facility-to-treat-medical-wastewater-using-electron-beam-technology>
- Lowe, H. L. (1956). Destruction of microorganisms in water, sewage and sewage sludge by ionizing radiations. *J. Am. Water Works Assoc.*, 1363-1372.

- Magnavacca, C. G. (2002). *Additional advantages of irradiation of sewage sludge for agricultural reuse*. Buenos Aires, Argentina: International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Miklos, G. (07 de Marzo de 2017). *China's First Wastewater Plant Using Radiation Opens*. Obtenido de International Atomic Energy Agency: <https://www.iaea.org/newscenter/news/chinas-first-wastewater-plant-using-radiation-opens>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (12 de Julio de 2018). Resolución 410/2018. *Resolución 410/2018*. Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina: Boletín Oficial.
- Muneer M., B. I. (2011). Treatment of Dyes Industrial Effluents by Ionizing Radiation. *Asian Journal of Chemistry*, 2392-2394.
- Naresh Kumar, Y. K. (2020). Radiation Hygienisation of Municipal Sewage Sludge: A New Way of Urban Waste Management. En A. a. Tyagi, *Non'Power Applications of Nuclear Technologies* (págs. 105-111). India: Bhabha Atomic Research Centre.
- Pachado, J. (2018). *Informe de asistencia tecnologica*. Buenos Aires: Laboratorio e microbiologica-Comision Nacional de Energia Atomica.
- Paur, H. (1997). Decomposition of volatile organic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in industrial off-gas by electron beams: a review. En IAEA, *Radiation technology for conservation of the environment* (págs. 67-86). Zakopane, Poland: IAEA.
- Pikaev, A. P. (1997). Combined electron-beam and ozone treatment of wastewater in the aerosol flow. *Radiation Physics and Chemistry Vol. 49*, 155-157.
- Podzorova, E. P. (1998). New data on electron-beam treatment of municipal wastewater in the aerosol flow. *Radiation Physics and Chemistry Vol. 52*, 361-364.
- Rela, P. S. (2008). The status of radiation process to treat industrial effluents in Brazil. En *Radiation Treatment of polluted Water and Wastewater (IAEA-TECDOC-1598)* (págs. 27-41). Vienna: IAEA.
- Rodriguez, R. (2018). *Porsecucion de la modelacion de la calidad del agua superficial en la cuenca hidrica matanza riachuelo*. Buenos Aires: UTN Avellaneda, Instituto Nacional del Agua, ACUMAR.
- Sharma, R. (15 de Diciembre de 2017). *Irradiation Technology comes to the aid of Swachh Bharat Mission*. Obtenido de Nuclear Asia: <https://www.nuclearasia.com/feature/irradiation-technology-comes-aid-swachh-bharat-mission/1688/>
- Singh, J. (16 de Marzo de 2016). Unstarred Question NO. 3122. *Unstarred Question NO. 3122*. India: Government of India Department of Atomic Energy.
- Süss, A. (1994). Use of sewage sludge as a fertilizer for increasing soil fertility and crop production. En IAEA, *Sewage Sludge and Wastewater for Use in Agriculture* (págs. 129-137). Vienna: IAEA.

- Swinwood, J.F., Fraser, F.M. (1993). Environmental applications of gamma technology: update on the canadian sludge irradiator. *Radiation physics and Chemistry Vol 42*, 683-687.
- Swinwood, J.F., Fraser, F.M. (1995). The canadian sludge irradiator project: unexpected challenges and opportunities. *Radiation Physics and Chemistry vol. 46*, 1147-1151.
- Tahri, L. E. (2010). Wastewater treatment using gamma irradiation: Tétouan pilot station, Morocco. *Radiation Physics and Chemistry*, 424-428.
- Takács, E. W. (2007). Azo dye degradation by high-energy irradiation: kinetics and mechanism of destruction. *NUKLEONIKA*, 69-75.
- TNN. (19 de Enero de 2022). *Radiation to help convert sludge into fertilizer*. Obtenido de Times of India: <https://timesofindia.indiatimes.com/city/indore/radiation-to-help-convert-sludge-into-fertilizer/articleshow/88983704.cms>
- Vinculación y Transferencia Tecnológica del 3ia-UNSAM. (2021). *Informe Final Guia de Adecuación Ambiental*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Universidad Nacional de San Martín.
- Willis, C. (29 de Junio de 2020). *Started with IAEA Support, China's Electron Beam Industry Opens World's Largest Wastewater Treatment Facility*. Obtenido de International Atomic Energy Agency: <https://www.iaea.org/newscenter/news/started-with-iaea-support-chinas-electron-beam-industry-opens-worlds-largest-wastewater-treatment-facility>
- Woods, R. a. (1994). *Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing*. En R. a. Woods. New York: Wiley-Interscience.