

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR RADIACION GAMMA*

Leonor Méndez

Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Avda. Venezuela, s/n, Lima

Recibido el 3 de marzo de 1990.

RESUMEN

Se evalúa la tratabilidad de las aguas residuales mediante radiación gamma para su reuso en riego agrícola. Se realizó mediciones de los indicadores de contaminación física, química, biológica y microbiológica. Para esto se irradiaron muestras provenientes del complejo de tratamiento de aguas residuales de San Juan de Miraflores hasta una dosis de 52.5 kGy. El estudio concluye que la radiación gamma es efectiva para remover parásitos y bacterias, más no para la remoción de la materia orgánica e inorgánica.

1. INTRODUCCION

El empleo de aguas residuales para irrigación de vegetales se practica en el país desde épocas antiguas, principalmente en zonas áridas y semiáridas, donde hay escasez de agua y esto influye en la CALIDAD sanitaria de los productos cultivados.

En situaciones similares muchos países han dictado normas para regular su reuso mediante sistemas de tratamiento.

El método de tratamiento con radiación gamma es alternativo a otros convencionales tales como los lodos activados, filtros percoladores, lagunas de estabilización y otros.

A partir de 1970 se operan en EE.UU [1-2], Alemania [3], Rusia [4] y la India [5] plantas piloto para el tratamiento de lodos residuales, utilizando como fuentes de radiación Co-60, Cs-137 y aceleradores de electrones.

En el Perú se estudió la desinfección de las aguas residuales [6] y se observó mediante estudios de laboratorio la viabilidad y efectividad de radiación gamma.

* Premiado por ser el mejor trabajo del XXII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental en San Juan de Puerto Rico (09 al 14 de setiembre de 1990) con la "MEDALLA DE AIDIS DE VENEZUELA" y Diploma de Honor.

Tabla 1: Criterios de Calidad de Aguas Residuales para usar en Agricultura.

CATEGORIA DE CULTIVO		DBO (mg/l)	COLIFORMES FECALES (NMP/100m)	NEMATODOS INTES- TINALES*
A	<ol style="list-style-type: none"> 1. Silvicultura 2. Algodón 3. Forraje de desecado (a) 	N. A.	(5-10)10 ^b	1
B	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hortalizas y frutas para envasado. 2. Cultivos industriales a ser procesados por calor. 3. Riego de parques cerrados. 4. Arboles frutales (b) 5. Forraje de consumo crudo (c) 6. Cultivos de consumo crudo que se sirven cocido. 7. Cultivos de consumo humano con cáscara que se consumen crudos. 	50-60	(5-10)10 ⁴	1
C	<ol style="list-style-type: none"> 1. Producto de consumo humano que se sirven crudos y que están en contacto con los efluentes. 2. Riego de parques y prados de libre acceso público. 3. Campos libres. 	15-30	10 ³	1

* unidades: No

- (a) El Forraje antes de consumo debe ser cosechado y secado al sol.
- (b) El riego debe suprimirse dos semanas antes de la cosecha, no debiendo recolectarse los frutos caídos.
- (c) Debe suprimirse el riego dos semanas antes que el ganado entre a pastar.

2. NORMAS

Existen normas nacionales [7] e internacionales [8] y recomendaciones [9 y 10], donde se indican la calidad de las aguas residuales, para su reuso en agricultura. En la tabla 1, se presenta un resumen de dichas normas y recomendaciones.

3. METODO EXPERIMENTAL

Antes de realizar las pruebas de laboratorio se hizo la calibración del equipo de irradiación gamma del Cs-137 a las condiciones de trabajo [11], utilizando el método "Fricke" [12].

Las muestras se tomaron del complejo de tratamiento de aguas residuales de San Juan de Miraflores, en donde los desechos líquidos se tratan mediante lagunas facultativas del distrito de San Juan de Miraflores, Pamplona Alta y Ciudad de Dios.

El desarrollo experimental comprende tres (3) etapas consecutivas, realizadas de acuerdo a los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales.

La primera serie de pruebas consistió en evaluar la degradabilidad de la materia orgánica e inorgánica, para lo cual se midieron los siguientes indicadores: (i) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (ii) Demanda Química de Oxígeno (DQO), (iii) Oxígeno Disuelto (OD), (iv) N-Total, (v) N- amoniacal, (vi) pH, (vii) sólidos suspendidos totales y (viii) conductividad eléctrica.

Las muestras se irradiaron hasta una dosis de 52.5 kGy, encontrándose que no existe una reducción en la concentración de la materia orgánica e inorgánica.

Las mediciones de los indicadores se realizaron siguiendo las técnicas descritas por los métodos normalizados para análisis de agua [13].

La segunda etapa estuvo orientada a ver la efectividad en la inactivación de los huevos de *Ascaris suum* (Fig. 1.), nemátodo propio del ganado bobino y porcino, y obtenido del camal de Yerbateros, este nemátodo tiene características semejantes con los *Ascaris lumbricoides* que son exclusivos del hombre, y se irradió a dosis que variaron de 0 a 5 kGy. El estudio de viabilidad de los huevos de *Ascaris suum* se realizó mediante observación microscópica y conteo.

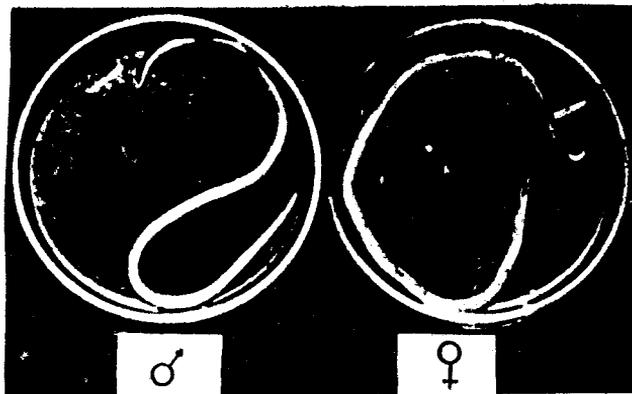


Fig. 1: Especímenes adultos de *Ascaris suum* (Fotografía Oscar Navarro).

La tercera etapa estuvo dirigida a determinar la tasa de degradación de las bacterias, y al efecto se seleccionó el coliforme fecal que viene a ser el indicador de contaminación fecal y el medio de evaluación de la efectividad de tratamiento de las aguas residuales. Se irradió a dosis que variaron de 0 a 1.4 kGy.

3.1 PROCESAMIENTO DE DATOS

- a) Viabilidad de los huevos *Ascaris suum*: Se determinó porcentaje de huevos larvados, el porcentaje de huevos viables de la prueba control se considera el 100%.
- b) Bacterias Coliformes fecales: La determinación de coliformes fecales se realizó mediante el método de los tubos múltiples [14].

El método mide la densidad de coliformes que vienen a ser el número más probable (NMP) por 100 ml de muestra. El decaimiento de las bacterias obedecen a una función exponencial expresada de las siguientes manera:

$$Y = b' c^{-a'x}, \quad (1)$$

donde: Y = densidad de coliformes (CMP/100 ml.), X = dosis absorbida (KGy), a' = tasa de mortalidad (kGy⁻¹), b' = densidad inicial de coliformes (NMP/100 ml.).

Tabla 2: Dosis de radiación gamma absorbida para determinar la degradabilidad de la materia orgánica e inorgánica, (1) muestra tomada del afluente crudo, (2) Muestra tomada del afluente de la laguna primaria, filtrada, y (3) muestra tomada del afluente de la laguna primaria.

Determinaciones	Dosis (kGy)									
	0.0	1.0	2.0	3.0	5.0	7.0	23.0	30.0	52.5	
DBO (mg/l) ¹	209	152		126	94					
DQO (mg/l) ¹	323					323	323	288	288	
OD (mg/l) ¹	0.8	0.1		0.1	0.1					
N-total (mg/l) ²	18	19		19	19					
N-NH ₃ (mg/l) ²	16	20		20	20					
pH unidades	6.6	6.6		6.6	6.6					
Sólidos suspendidos										
totales (mg/l) ³	71	71		74	86					
c. eléctrica (Umho/cm)	675	710	665							

Expresando la ec (1) en forma lineal sería:

$$Z = b - aX, \quad (2)$$

donde $Z = \log y$, $b = \log b'$, $a = a' \log e$.

El ajuste de curva a un modelo lineal en el plano semilogarítmico fue realizado mediante el programa RFTT [15].

4. RESULTADOS

En la tabla 2, se presenta los resultados de los indicadores de contaminación orgánica e inorgánica en función de la dosis de radiación gamma.

En la tabla 3 se presenta el porcentaje de huevos viables de *Ascaris suum* vs. dosis de radiación gamma e ilustrados en la Fig. 2.

Tabla 3: Porcentaje de huevos larvados de *Ascaris suum* vs. dosis de radiación gamma absorbida en tres experimentos.

% HUEVOS Dosis (kGy)	EXP 1		EXP 2		EXP 3	
0.0	21.87	100.00	96.62	100.00	17.20	100.00
1.0	2.88	10.64	2.14	22.14		
1.2					3.22	18.78
1.4					1.10	6.39
1.6					1.10	6.39
1.8					0.00	0.00
3.0	0.00					
5.0	0.00					

En la tabla 4, se indica los resultados de la concentración de coliformes fecales vs. dosis de radiación gamma:

Los resultados con límites de confianza de 68% son:

$$Y = (6.33 \pm 0.09) - (3.66 \pm 0.11) X, \quad (3)$$

Modelo:

$$Z = (2.11 \pm 0.44) 10^6 \exp(- (8.42 \pm 0.21) X), \quad (4)$$

Estos valores son ilustrados en la Fig. 3.

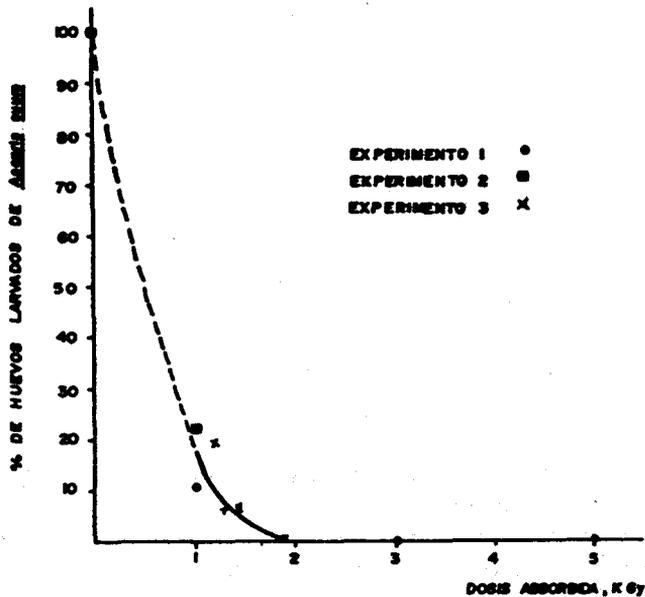


Fig. 2: Inactivación de huevos de *Ascaris suum* para diferentes dosis de radiación gamma.

Tabla 4: Valores promedio de la concentración de coliformes fecales (3 experimentos) Vs. dosis de radiación gamma absorbida.

Dosis (kGy)	Coliformes Fecales (NMP 100 ml.)		Límite Inf.		Límite Super		
	C.F.	log.CF	L.I.	log. LI	L.S.	log. LS	desv. estand
0.0	22 x 10 ⁵	6.38	43 x 10 ⁴	5.68	10 x 10 ⁶	7.00	0.69
0.2	31 x 10 ⁴	5.49	47 x 10 ³	4.67	16 x 10 ⁵	6.20	0.77
0.4	97 x 10 ³	4.98	14 x 10 ³	4.14	52 x 10 ⁴	5.72	0.78
0.6	12 x 10 ²	4.08	18 x 10 ²	3.25	60 x 10 ³	4.78	0.76
0.8	24 x 10 ²	3.38	26 x 10	2.41	88 x 10 ²	3.94	0.76
1.0	5 x 10 ²	2.69	82	1.91	2 x 10 ²	3.32	0.70
1.2	54	1.73	9	0.95	21 x 10	2.32	0.68
1.4	26	1.41	4	0.60	14 x 10	2.14	0.77

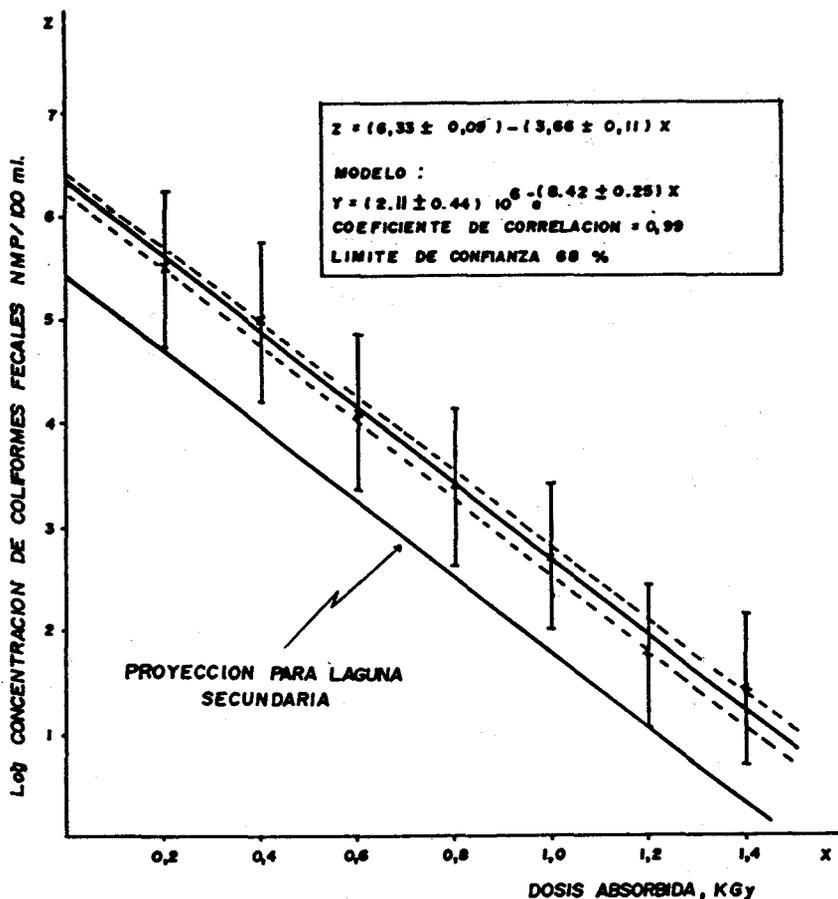


Fig. 3: Reducción de coliformes fecales para diferentes dosis de radiación gamma. Laguna primaria.

5. INTERPRETACION DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos se deduce el efecto de la radiación gama sobre la materia.

5.1 ALTERNACION DE LA MATERIA ORGANICA E INORGANICA:

El OD disminuye debido a que ha reaccionado con los radicales libres formados como efecto de las radiolisis del agua [12].

El nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, demanda química de oxígeno, pH, sólidos suspendidos, conductividad eléctrica, tienen una reducción poco apreciable, al ser expuesto hasta

PRUEBA CONTROL



División Binaria



Formación de Morula



Huevo Larvado

IRRADIADO A 1 KGy



División Binaria



Formación de Morula (anormal)



Huevo Larvado

IRRADIADO A 3 KGy



Desintegración

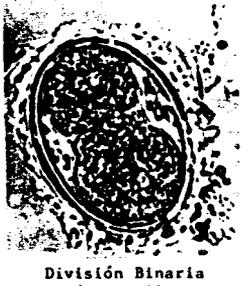


División Anormal

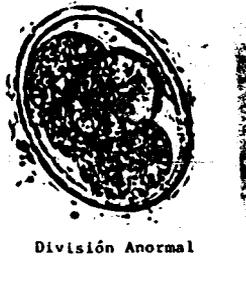


División Anormal

IRRADIADO A 5 KGy



División Binaria (anormal)



División Anormal



División Anormal

Fig. 4: Desarrollo de los huevos de *Ascaris suum* (fotografía Marco Espinoza, Laboratorio de Citogenética y Radiobiología del Centro Nuclear "RACSO")

una dosis de 52.5kGy, debido a que la energía total aplicada no fue suficiente para que se evidencie su efecto en la ruptura de enlaces.

5.2 ALTERACIONES BIOLÓGICAS

Se ha observado que las radiaciones gamma aceleran el proceso de división celular de los huevos de *Ascaris suum*. Al efecto en las muestras sometidas a la radiación las células empezaban su división (reproducción) en menos tiempo comparado con una muestra control, pero el efecto más notable de la radiación es la alteración en la morfología del número de las células al momento de la división (Fig. 4.). También se observó a dosis menores a 1.8 kGy desarrollo larval, y a dosis superiores de 1.8 kGy el desarrollo larval se inactiva (Ver Fig.2).

5.3 ALTERACIONES DE LAS BACTERIAS COLIFORMES

Las bacterias coliformes tienen una gran sensibilidad a las radiaciones gamma, se encontró una tasa de mortandad para coliformes fecales de 8.42 kGy^{-1} al ser expuesto a dosis de 0 a 1.4 kGy.

Los efectos de la radiación en los seres vivos es debido a que la radiación induce cambios en la forma y estructura celular, alteración de los procesos metabólicos y reproductivos incluyendo la inducción de mutaciones y muerte celular.

Además cabe mencionar que las radiaciones inactivan a las bacterias por ser organismos con una membrana protectora simple a una dosis de 1.4 kGy, mientras que los huevos de *Ascaris suum* son inactivados a dosis mayores de 1.8 kGy por ser su membrana de diferente constitución y origen.

6. ESQUEMAS DE TRATAMIENTO PROPUESTO

Para lograr la calidad de agua residual planteada en (2) se seguirá el siguiente esquema:

6.1 PRIMERA CATEGORIA

Para alcanzar la concentración de coliformes fecales de 5×10^6 NMP/100 ml de un afluente crudo, que normalmente tiene una concentración promedio de coliformes fecales de 46×10^6 NMP/100 ml; se necesita una dosis menor que para alcanzar un huevo de nemátodo viable por litro, y la dosis de radiación gamma absorbida para este caso es 1.8 KGy según la Fig. 2, siendo la cantidad de protozoarios y helmintos de 22 por litro en un efluente crudo.

Sin embargo el diseño de una planta de tratamiento por radiaciones requiere que el agua a tratar sea homogénea, y que este libre de material sedimentable y flotante, puesto que la presencia de este material perturbaría el buen funcionamiento del reactor. Por lo tanto, la dosis que recibe la muestra no sería el mínimo indispensable, por este motivo se requiere de un pre-tratamiento mínimo que consistiría en remover los sólidos sedimentables, y podría hacerse a través de un sedimentador o una laguna anaeróbica con 4 días de periodo de retención.

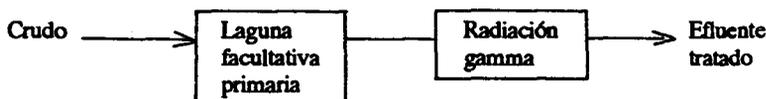
El sedimentador tiene el inconveniente de que se necesita remover los lodos diariamente, además de la construcción de un digestor de lodos el cual genera un incremento en los costos de tratamiento y mantenimiento. Por lo cual se ha considerado utilizar una laguna anaeróbica.



6.2 SEGUNDA CATEGORIA

Para alcanzar una DBO de 30 mg/l se requiere un tratamiento del nivel secundario que podría ser: lodos activados, filtro percolador, oxidación química o lagunas facultativas primarias. Tratar mediante lodos activados, filtro percolador u oxidación química se necesita equipos muy complejos, su mantenimiento y operación también son complicados, mientras que las lagunas facultativas son más prácticas, y a nivel nacional son las más empleadas, además tienen la ventaja de que a parte de remover la DBO, remueven eficientemente bacterias y parásitos. Por el cual se ha considerado utilizar una laguna facultativa primaria.

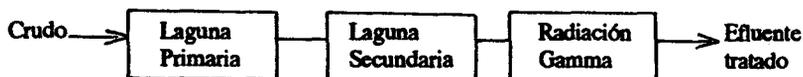
Para alcanzar una concentración de: 5×10^4 NMP/100 ml, de coliformes fecales de un efluente de una laguna primaria según la figura 3, necesita absorber una dosis de radiación gamma de 0.44 kGy. La concentración de c. fecales en una laguna primaria de 24×10^5 NMP/100 ml, y la cantidad de huevos de *Ascaris lumbricoides* es de 1 por litro.



6.3 TERCERA CATEGORIA

Para alcanzar una DBO soluble de 15 mg/l se requiere un tratamiento del nivel secundario que podría ser: lodos activados, filtro percolador, oxidación química o lagunas primarias seguidas de lagunas de maduración (secundaria). En este caso específico se ha considerado utilizar una laguna primaria seguida de secundaria por ser más práctica, de fácil operación y mantenimiento, la cual logra remover *Ascaris lumbricoides* a una cantidad de cero huevos viables por litro.

Por lo tanto para alcanzar la concentración de 1000 NMP/100 ml de C. fecales de un efluente de laguna secundaria según Figura 3, necesita absorber una dosis de radiación gamma de 0.67 kGy. La concentración de C. fecales en una laguna secundaria es de: 27×10^4 NMP/100 ml.



En la tabla 5, se encuentra resumido la Categoría de cultivos, calidad de agua residual a utilizar para cada categoría y los tipos de tratamiento.

7. CONCLUSIONES

El método de tratamiento de las aguas residuales mediante radiación gamma es efectivo para remover bacterias, e inactivar la fase larval de los parásitos. Para el caso de la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno no es eficiente, puesto que a la dosis expuestas los microorganismos han sido destruidos o inactivados, motivo por el cual los resultados obtenidos no muestran su relación real con la materia orgánica biodegradable. Además el tratamiento con radiaciones no es efectivo para remover materia orgánica e inorgánica.

REFERENCIAS

- [1] EICHLIZ, GEOFEREY G., CRAFT. F. y SUH, D. Y., *Nuclear Engeneering and Health physics Programs, Georgia Institute of Technology Atlanta G.A.* 1985 (1-50)
- [2] AHLSATROM, SCOTT B, *Radio Phys. Chem, Vol 25 (1-3) 1985 pp. 1-10.*
- [3] LESSEL T. y SUES A., *Prog. Wat Tech. Vol 10 (1/2) 1978 pp. 641-652.*
- [4] PETROV A.N. SHUBIN, V.N. y KULIKOV, A. V., *Academy of Sciences of the URSS. Vol 19 (5) 1985 pp. 387-388.*
- [5] KRISHN MURTHY K., *Rad. Phys. Chem. Vol 28 (4) 1986 pp. 381-386.*
- [6] ARENAS CARRASCO JOSE y WONG, MARIA, *Desinfección de afluentes residuales. IPEN Lima 1986.*
- [7] *Decreto ley 17752, agosto 1988.*
- [8] HEALTH GUIDELINES, *Technical Report Series 778. O.M.S. Ginebra 1989.*
- [9] ROJAS VARGAS, RICARDO, *Servicio de agua potable y alcantarillado de Trujillo Lima 1986.*
- [10] ARTHUR J.P. *World Bank Technical paper number 7, USA 1983.*
- [11] RIVAS MIJARES, GUSTAVO. *Tratamiento de Aguas residuales, Biblioteca de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. Caracas, 1967.*
- [12] *Manual Of. food irradiation dosimetry. Technical Series No. 178. International Atomic Energy Agency. Viena 1977.*
- [13] CASTRO, MARIA LUISA, *Procedimientos simplificados de análisis químicos de aguas residuales. CEPIS Lima 1983.*
- [14] VARGAS DE MAYO, CARMEN. *Métodos simplificados de análisis microbiológicos de aguas residuales CEPIS. Lima 1983.*
- [15] SZATMARY, ZOLTAN, *RFTI, KFI 1977 - 43, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 1977.*

Tratamiento de aguas residuales por radiación gamma por Leonor Méndez se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.