

6



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

RADIOLISIS DE LA TIAMINA, RIBOFLAVINA Y PIRIDOXINA EN SOLUCION ACUOSA.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
PRESENTA:
JUAN MANUEL BELTRAN TEXOCOTITLA

REALIZADO EN EL INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES. UNAM.



MEXICO, D. F.

JUNIO DEL 2002.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA**

**OFICIO: FESZ/JCIQ/033/02**

**ASUNTO: Asignación de Jurado**

**ALUMNO: BELTRAN TEXOCOTITLA JUAN MANUEL**  
**P r e s e n t e .**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

<b>Presidente:</b>	<b>M. en C. Fca. Leonora Sánchez García Figueroa</b>
<b>Vocal:</b>	<b>Dra. Ma. Guadalupe Albarrán Sánchez</b>
<b>Secretario:</b>	<b>M. en C. A. Lourdes Castillo Granada</b>
<b>Suplente:</b>	<b>M. en Q. Eloisa Anleu Avila</b>
<b>Suplente:</b>	<b>Q.F.I. Ma. del Carmen Niño de Rivera O.</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A t e n t a m e n t e**  
**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**  
México, D. F., 27 de febrero del 2002.

**EL JEFE DE LA CARRERA**

**I.Q. ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
INGENIERÍA QUÍMICA  
SECRETARÍA TÉCNICA

AEMG/\*

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## **AGRADECIMIENTOS.**

A la Dra. Guadalupe Albarrán Sánchez por su paciencia y dedicación prestadas al dirigir esta tesis.

A Epifanio Cruz, José Luis Reza y Bertha Milla, por toda la ayuda recibida en la elaboración de la misma.

A los directivos del Instituto de Ciencias Nucleares, que fue donde se realizó la investigación, por todo el apoyo brindado en la realización de los experimentos.

## **A MIS PADRES.**

Manuel Beltrán Lira (MEME) y Juana Texcotitla Mata (Juanita), que aunque nunca están de acuerdo en lo que hago, siempre me apoyan en todo.

## **A MIS HERMANOS.**

Olga, Ascencio, Raúl, Socorro, Silvia, Berta y Alejandro, por respetar mis decisiones y ayudarme siempre en lo que pueden.

## **A TODA MI FAMILIA.**

Que es muy grande (sobrinos, cuñados, tíos, tías, primos) una parte de este trabajo se las dedico a ustedes. Y A TODOS MIS AMIGOS.

**Y EN ESPECIAL...**

**Con amor infinito a NELY DARIO BRAVO, la mujer que ha cambiado mi vida, en agradecimiento a su apoyo y forma de ser conmigo (sin temores, ni malicias).**

**Se me olvida, también con cariño especial a VIANNEY MELISA.**

## INDICE

	PÁGINA
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>GENERALIDADES</b>	1
1.1 Descripción.	3
1.1.1 Tiamina.	3
1.1.2 Riboflavina.	4
1.1.3 Piridoxina.	5
1.2 Importancia.	5
1.2.1 Tiamina.	5
1.2.2 Riboflavina.	6
1.3.3 Piridoxina.	6
1.3 Concentración en los alimentos.	7
1.3.1 Contenido de Tiamina en algunos alimentos.	7
1.3.2 Contenido de Riboflavina en algunos alimentos.	8
1.3.3 Contenido de Piridoxina en algunos alimentos.	8
1.4 Química de radiaciones.	9
1.4.1 Conceptos básicos.	9
1.4.2 Radiólisis del agua.	14
1.5 Irradiación.	16
1.5.1 Irradiadores.	16
1.5.2 Características de las instalaciones y equipos.	17
1.5.3 Fuentes de irradiación.	17
1.6 Dosimetría de las fuentes de irradiación.	18
1.7 Irradiación de alimentos.	19
1.7.1 Procedimiento para la irradiación de alimentos.	19
1.8 Dosis de irradiación.	19
1.8.1 Desinfección por insectos.	20
1.8.2 Prevención de enfermedades causadas por alimentos.	20
1.8.3 Extensión del periodo de almacenamiento.	21
1.8.4 Inhibición de brotes.	21
1.8.5 Destrucción de parásitos.	21
1.8.6 Descontaminación de especias.	21

1.9 Radiólisis de las vitaminas.	22
1.9.1 Radiólisis de la Tiamina.	23
1.9.2 Radiólisis de la Riboflavina.	24
1.9.3 Radiólisis de la Piridoxina.	25
<b>OBJETIVOS.</b>	<b>27</b>
<b>PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>28</b>
2.1 Reactivos.	28
2.2 Preparación de muestras.	28
2.3 Análisis de muestras irradiadas.	29
2.4 Componentes del irradiador Gammabeam 651 PT.	29
2.5 Cromatografía de Líquidos de alta Resolución (CLAR).	31
2.6 Procedimiento.	32
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES.</b>	<b>34</b>
3.1 Resultados de la Tiamina.	34
3.1.1 Curva patrón de Tiamina por CLAR.	34
3.1.2 Efectos de la dosis de irradiación en la Tiamina.	35
3.2 Resultados de la Riboflavina.	40
3.2.1 Curva patrón de Riboflavina por CLAR.	40
3.2.2 Efectos de la dosis de irradiación en la Riboflavina.	41
3.3 Resultados de la Piridoxina.	45
3.3.1 Curva patrón de Piridoxina por CLAR.	45
3.3.2 Efectos de la dosis de irradiación en la Piridoxina.	46
<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>50</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.</b>	<b>52</b>
<b>INDICE DE TABLAS.</b>	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>54</b>



## INTRODUCCIÓN

Nuestro tema a tratar es la descomposición que sufren la tiamina, riboflavina piridoxina, estas se expusieron en solución acuosa, a una concentración determinada previamente en un proceso de radiación gamma a diferentes dosis, de cada una de estas se cuantifico el porcentaje de perdida que sufrían a cada una de la dosis de exposición, el cual fue determinado con la ayuda de la Cromatografía de líquidos de alta resolución (CLAR). Las vitaminas son compuestos que fácilmente pueden afectarse durante el proceso de conservación por irradiación a que son sometidos los alimentos y, debido al papel fundamental que tienen en el organismo, para su buen funcionamiento, es de vital importancia la determinación de la pérdida en su concentración obtenida por la acción de la radiación ionizante, así como los parámetros que modifican esta pérdida.

La primera parte de este capítulo se mencionan algunos datos importantes acerca de las diferentes vitaminas: Tiamina (Vitamina B1), Piridoxina (Vitamina B6) y Riboflavina (Vitamina B2), además de revisar los conceptos básicos de Química de Radiaciones, posteriormente se hace un resumen de las aplicaciones que tiene la radiación ionizante y finalmente se mencionan las referencias que existen acerca de los efectos de la radiación ionizante sobre las vitaminas anteriormente citadas. Después se mencionan los objetivos que se persiguen. La segunda parte de este capítulo se trata la parte experimental, los reactivos utilizados, equipo de análisis, así como la fuente de irradiación que se uso. En la siguiente parte los resultados y discusión de los mismos y por ultimo las conclusiones y referencias.

## GENERALIDADES

El desarrollo de nuevas tecnologías para el procesamiento de alimentos surge como una respuesta a la demanda de los consumidores por productos con características semejantes a las de los productos frescos y con vida útil, o comparable a la de los productos procesados por métodos térmicos convencionales. Dentro de las tecnologías emergentes de mayor interés se encuentran: alta presión hidrostática, pulsos de alta intensidad de campo eléctrico, campos magnéticos oscilantes, pulsos de luz e irradiación. Las nuevas técnicas ayudan a la inactivación (daño o muerte) de microorganismos patógenos y demás enzimas que ocasionan cambios en color o sabor.

Debido a estos procesos no hacen uso del calor como fuente de inactividad microbiana dando lugar en muchos casos, a productos listos para el consumidor sin grandes cambios en color, sabor, textura y propiedades nutrimentales del alimento; A diferencia de lo que sucede en procesos térmicos en los que hay cambios en color, sabor y contenido de nutrimentos<sup>(1)</sup>.

Una breve descripción de estas nuevas y promisorias tecnologías se dan a continuación:

#### **ALTA PRESION HIDROSTATICA.**

Durante el procesamiento de alimentos por alta presión hidrostática (APH) se aplica presión al alimento de manera uniforme y en todas las direcciones. El tratamiento de APH se puede aplicar a alimentos de cualquier geometría y tamaño, así como a alimentos envasados por lo que se evitaría una contaminación posterior al procesamiento del alimento. Al aplicar APH a la célula microbiana, ésta no es capaz de controlar sus funciones como son la absorción de nutrimentos y eliminación de desechos, por lo que no puede reproducirse y eventualmente muere <sup>(1)</sup>.

#### **PULSOS DE ALTA INTENSIDAD DE CAMPO ELECTRICO.**

Durante el tratamiento por Pulsos de alta intensidad de campo eléctrico (PE) el alimento es expuesto a un campo eléctrico de gran magnitud por un corto tiempo. El efecto de esta exposición se ve reflejado en el movimiento de las partículas con carga eléctrica (iones). El mecanismo de inactivación de microorganismos por PE no ha sido enteramente entendido. Cuando se aplica un campo eléctrico a la célula, las cargas eléctricas a través de la membrana celular se incrementan. Las cargas acumuladas en ambos lados de la membrana celular se atraen, por lo que la membrana se comprime y su espesor se reduce. Las fuerzas elásticas de la membrana se oponen a la compresión. Sin embargo, cuando la atracción de cargas es mayor, se originan poros en la membrana celular. Este fenómeno físico es conocido como electroporación. La formación de poros puede ser reversible o irreversible de acuerdo a la intensidad del campo eléctrico aplicado. La electroporación irreversible de la membrana celular es la base de la pasteurización de alimentos por pulsos de alta intensidad de campo eléctrico. Los factores que afectan la inactividad de los microorganismos por PE son dependientes del microorganismo, el medio de tratamiento y las condiciones de tratamiento <sup>(1)</sup>.

#### **CAMPOS MAGNÉTICOS OSCILANTES.**

De manera similar al proceso de pulsos de alta intensidad de campo eléctrico, el alimento es expuesto a un campo magnético. Pese a la ventaja que ofrece esta tecnología con la posibilidad de tratar el alimento en su envase, su efectividad para inactivación microbiana no ha sido del todo probada. Los resultados informados hasta ahora sobre el efecto que los campos magnéticos ejercen en microorganismos y en otros sistemas biológicos son contradictorios, y los mecanismos de acción no han sido esclarecidos <sup>(1)</sup>.

#### **PULSOS DE LUZ DE ALTA INTENSIDAD.**

En esta tecnología se hace uso de rayos de luz de alta intensidad que se aplican por milisegundos. El material que se va esterilizar se expone al menos a un pulso de luz. El espectro de luz empleado es amplio, se utilizan longitudes de onda que van del ultravioleta hasta el infrarrojo con una intensidad aproximadamente igual a 20,000 veces la intensidad de la luz solar sobre el nivel del mar. Los efectos antimicrobianos son mayores que aquellos obtenidos por irradiación ultravioleta convencional. Por lo general se aplica a la superficie de alimentos o superficies en contacto con los alimentos, envases

o medios transparentes en donde la luz puede penetrar. Los pulsos de luz inactivan todo tipo de bacterias y microorganismos con igual efectividad, por lo que se emplea en la esterilización de agua embotellada. La presencia de superficies irregulares disminuye la eficacia del tratamiento puesto que éstas pueden proteger al microorganismo de la exposición al pulso de luz <sup>(1)</sup>.

Las nuevas técnicas de conservación de alimentos en la actualidad utilizan cada vez mas la radiación ionizante, para suplir las desventajas que producen otras técnicas de conservación. A raíz de esto existe la posibilidad que esta radiación modifique el valor nutricional de estos o descomponga en cierto grado los compuestos que contiene.

## VITAMINAS

Las vitaminas son sustancias químicas presentes en pequeñas cantidades en los alimentos, que son indispensables para la vida, salud, actividad física y cotidiana de los seres vivos. Las vitaminas no producen energía, por lo tanto, no producen calorías. Estas intervienen como catalizadores en las reacciones bioquímicas provocando la liberación de energía. En otras palabras, la función de las vitaminas es la de facilitar la transformación que siguen los sustratos a través de las vías metabólicas.

Estas pueden ser clasificadas según dónde vienen disueltas. Las vitaminas disueltas en la parte grasa de los alimentos se llaman liposolubles, y las vitaminas disueltas en la parte acuosa de los alimentos se llaman hidrosoluble. Las vitaminas hidrosolubles realizan funciones como precursores de enzimas o co-enzimas. Y las vitaminas liposolubles tienen funciones menos específicas.

### 1.1 DESCRIPCION.

#### 1.1.1 TIAMINA (B1)

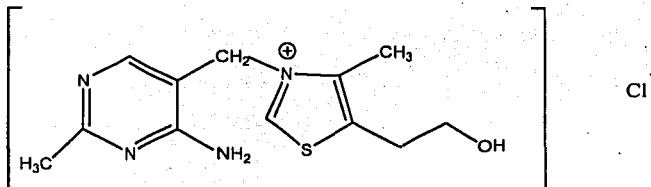


Figura 1. Fórmula desarrollada de tiamina.

### Propiedades físicas

El nombre químico de la tiamina es cloruro de 3- [(4-amino-2-metil-5-pirimidinil)-metil]-5-(2-hidroxi-etil)-4-metil tiazolio <sup>(2)</sup>. Se presenta como cristales incoloros o polvo cristalino blanco con un olor característico, los cuales funden con descomposición entre 248-250 °C, con un peso molecular de 337.28 g/mol, estos cristales son estables al oxígeno atmosférico. En cuanto a su solubilidad, en agua son muy solubles: un gramo se disuelve aproximadamente 1 mL de agua, y prácticamente insolubles en éter, benceno, hexano y cloroformo. En forma anhidra la tiamina es estable, el calentamiento a 100 °C por 24 horas no disminuye su actividad <sup>(2)</sup>.

### 1.1.2. RIBOFLAVINA.

La Riboflavina [ 7, 8-dimetil-( 1'- D-ribitol) isoaloxazina] estructuralmente esta compuesta de una cadena isoaloxazina junto con un ribitol con un cambio de sitio de un nitrógeno a la posición 10, tiene un peso molecular de 376.37 g/mol <sup>(2)</sup>.

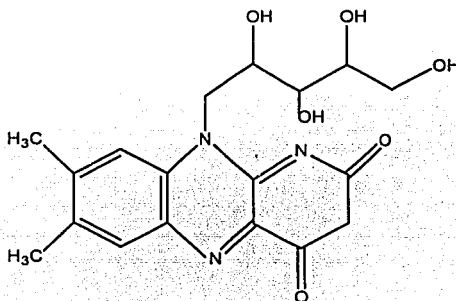


Figura 2. Fórmula desarrollada de la Riboflavina.

Las formas biológicas en que se encuentran algunos derivados de la riboflavina son: flavinas mononucleotida (FMN) y flavina - adenina dinucleotida (FAD). La Riboflavina es fácilmente detectable durante procedimientos cromatográficos debido a su fuerte absorción en la luz ultravioleta (UV) y a otras intensidades de fluorescencia. Las soluciones naturales de riboflavina son de color amarillo verdosas <sup>(3)</sup>.

### 1.1.3. PIRIDOXINA.

El clohidrato de 5-hidroxi 6-metil 3,4-piridinedimetanol, también conocido como Piridoxina o vitamina B<sub>6</sub>, es estable a la luz y al medio ambiente, con un punto de fusión de (205-212 °C). Presenta un máximo de absorción en medio ácido (0.1N HCl) en la región ultra-violeta de 290 nm. Un gramo se disuelve en 4.5 mL de agua y 90 de alcohol, insoluble en éter y cloroformo. Sus soluciones acuosas ácidas son estables y puede ser calentado por 30 minutos a 120 °C sin descomponerse <sup>(2)</sup>.

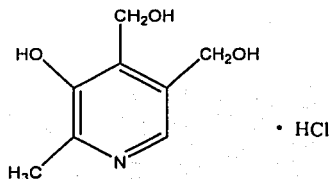


Figura 3. Fórmula desarrollada de la Piridoxina.

Hay seis formas independientes de vitamina B<sub>6</sub> (el fosfato de piridoxamina, la piridoxamina, el fosfato de piridoxina, la piridoxina, el fosfato de piridoxal y el piridoxal) pero solo una como producto metabólico que es la piridoxina. La bioquímica de esta vitamina es muy compleja, para los estudios metabólicos.

## 1.2. IMPORTANCIA.

### 1.2.1. TIAMINA.

Las funciones de la tiamina están fundamentalmente asociadas al metabolismo de carbohidratos. Al combinarse con el ácido pirofosfórico (H<sub>4</sub>O<sub>7</sub>P<sub>2</sub>) se convierte en pirofosfato de tiamina (C<sub>12</sub>H<sub>19</sub>ClN<sub>4</sub>O<sub>7</sub>P<sub>2</sub>S) en células nucleadas, particularmente en el pulmón, riñones y las células blancas de la sangre. El pirofosfato de tiamina también conocido como cocarboxilasa actúa como coenzima en reacciones como la descarboxilación de α - cetoácidos, particularmente de piruvato y de α - cetoglutarato. El pirofosfato de tiamina también actúa como coenzima en la ruta oxidativa directa del metabolismo de la glucosa.

La deficiencia de la tiamina trae como consecuencia fatiga, anorexia, disturbios gastrointestinales, taquicardia e irritabilidad. Los signos clínicos de la deficiencia de tiamina se hacen evidentes después de 2 a 5 semanas de una ingestión inadecuada de tiamina. Los sistemas en el organismo que son afectados principalmente por la deficiencia son el sistema nervioso cardiovascular y el tracto gastrointestinal. Su administración revierte los síntomas cardiovasculares y gastrointestinales de la deficiencia de tiamina, sin embargo, el grado de mejoría en los síntomas neurálgicos depende de la duración y severidad de las lesiones. En estados de deficiencia ocurre una acumulación de los ácidos pirúvico y láctico <sup>(4)</sup>.

Después de ingerirse oralmente en los humanos, es absorbida en el tracto gastrointestinal y es ampliamente distribuida a la mayoría de los tejidos del cuerpo. En el humano no se almacena en cantidades apreciables y las cantidades que exceden los requerimientos del organismo son excretados en la orina.

Los requerimientos de esta vitamina están relacionados directamente con la ingestión de carbohidratos y a la velocidad metabólica, por lo que estos se incrementan durante periodos de crecimiento activo o de trabajo muscular intenso, durante el embarazo y la lactancia y en condiciones patológicas como fiebre, alcoholismo, hipertiroidismo y en otras que cursan con un incremento en el metabolismo o la diuresis.

Para asegurar un aporte adecuado se recomienda una ingestión básica de 0.40 mg/kcal en la dieta. Así, por ejemplo, para una persona cuya dieta tiene un aporte calórico diario de 3000 kcal, la ingestión recomendada de tiamina es de 1.2 mg al día <sup>(4)</sup>.

### 1.2.2. RIBOFLAVINA.

La riboflavina es una vitamina hidrosoluble del complejo B la cual actúa como factor en la síntesis adrenal de corticoides, formación de glóbulos rojos, en síntesis de glicógeno, metabolismo de ácidos grasos, actividad de la hormona tiroidea, optimiza el sistema inmunológico manteniendo en buen estado las mucosas de los aparatos respiratorio y digestivo, regula el crecimiento y además la reproducción de las células <sup>(4)</sup>.

El espectro de absorción presenta un máximo en 223, 268, 359-375, 446, y 475 nm, y la absorción en el espectro visible usa las medidas cuantitativas de la riboflavina. El espectro de absorción de la FMN y FAD son muy similares a los que tiene la riboflavina. Los tres pierden su absorbancia en la región visible cuando estos son reducidos por dos electrones. La riboflavina, FMN y FAD todos presenta emisión de fluorescencia alrededor de 530 nm.

La función primaria de las flavinas en la Bioquímica es actuar como una coenzima en reacciones redox. Estas también ocupan una posición crucial en la bioquímica redox por que ellas posibilitan la salida de 1 ó 2 electrones de proceso en la reacción redox. Reducidas estas son extremadamente reactivas con oxígeno molecular formando óxido de flavinas y peróxido de hidrógeno.

La más importante de sus propiedades químicas, el cual también se agrega al problema de análisis, es su sensibilidad a la luz. En realidad, la riboflavina es relativamente estable al calor si se protege de la luz. La riboflavina, por lo tanto, es resistente a su destrucción durante el cocinado. De cualquier manera la leche expuesta a la luz del sol por 2 horas pierde mas de 50 % de su contenido de riboflavina. La riboflavina en una solución alcalina cuando es expuesta a la luz UV se descompone mas

relativamente a un compuesto conocido como lumiflavina, y este fenómeno es usado para aumentar la detección en procedimientos cromatográficos<sup>(3)</sup>.

Los principales síntomas de su deficiencia son: piel escamosa, ojos rojizos y anemia, también son comunes las llagas y los labios partidos. La riboflavina no es tóxica o sea que se puede tomar todo lo que uno quiere y el único efecto secundario es el color amarillento verdoso de la orina, pero no causa problema. Las personas que tienen mayor deficiencia en riboflavina son: atletas, vegetarianos estrictos, mujeres embarazadas, personas de la tercera edad, diabéticas y los que toman antidepresivos tricíclicos, la dosis recomendada es de alrededor de 1.3 mg/día<sup>(6)</sup>.

### 1.2.3. PIRIDOXINA.

La piridoxina actúa como coenzima de muchas enzimas que participan en el metabolismo de los aminoácidos, por lo tanto tienen una función muy importante en el metabolismo de las proteínas. También actúa como cofactor de los carbohidratos y grasas, contribuye además a crear glóbulos rojos en la sangre. Ayuda a mantener el sistema inmunológico fuerte al regular la producción de anticuerpos. Además es necesaria para la producción de varios neurotransmisores (serotonina, dopamina, noradrenalina), así mismo, ayuda a mantener en regla nuestros estados de ánimo y nuestro humor y modula los efectos de las hormonas masculinas y femeninas.

Entre los individuos con mayor riesgo a padecer carencia de piridoxina se encuentran aquellos con alta ingesta de proteínas, ya que las necesidades de piridoxina aumentan a medida que aumenta el consumo de proteínas. Además una dieta pobre en piridoxina puede conducir a problemas cardíacos (los bajos niveles de piridoxina se relacionan con ataques al corazón), depresión y desbalance emocional, convulsiones en niños pequeños, piel inflamada, labios paspados, y un sistema inmune deficiente. También cálculos en el riñón y anemia<sup>(5)</sup>.

## 1.3. CONCENTRACIÓN EN LOS ALIMENTOS.

### 1.3.1. CONTENIDO DE TIAMINA EN ALGUNOS ALIMENTOS.

La tiamina se presenta en concentraciones bajas en una gran variedad de tejidos animales y vegetales, pero existen pocos alimentos en los cuales se presente en abundancia. Las fuentes naturales más ricas son la levadura seca y el germen de trigo, pero estos se ingieren en cantidades pequeñas. La carne de cerdo la contiene en grado notable. Los cereales, leguminosas, diferentes tipos de carne (incluyendo la de aves), la yema de huevo, así como el pescado, son buenas fuentes de tiamina. La leche y los productos lácteos, fruta y vegetales no son ricos en tiamina, pero cuando se consumen regularmente, contribuyen de manera importante a la ingestión total de esta vitamina<sup>(7,8)</sup>.

TABLA 1. ALIMENTOS RICOS EN TIAMINA <sup>(8)</sup>

Alimento	Tiamina mg/100 g
Levadura	12
Germen de trigo	1.98-2.05
Soya	0.89-1.10
Carne de cerdo	0.44-0.90
Avena	0.49-0.73
Frijol	0.43-0.73
Almendra	0.50-0.71
Lenteja	0.61-0.69
Trigo entero	0.48-0.59
Harina de maíz	0.22-0.26
Carne de res	0.07-0.11
Huevo fresco	0.08-0.10
Papa	0.07-0.11
Pescado (sierra)	0.04-0.06
Acelga	0.05-0.09
Leche pasteurizada	0.02-0.03
Papaya	0.02-0.03
Fresa	0.02-0.03

Cantidad recomendada por día: 1.2 mg

### 1.3.2. CONTENIDO DE RIBOFLAVINA EN ALGUNOS ALIMENTOS.

Se encuentra principalmente en carnes, pescados y alimentos ricos en proteínas en general.

TABLA 2. ALIMENTOS RICOS EN RIBOFLAVINA <sup>(9)</sup>

Alimento	Riboflavina mg/100 g
Viseras y despojos carnicos	3.17
Levadura de cerveza	2.07
Germen de trigo	0.81
Almendras	0.70
Coco	0.60
Quesos grasos	0.55
Champiñones	0.44
Mijo	0.38
Quesos curados y semicurados	0.37
Salvado	0.36
Huevos	0.31
Lentejas	0.26

Cantidad recomendada por día: 1.3 mg



### 1.3.3. CONTENIDO DE PIRIDOXINA EN ALGUNOS ALIMENTOS.

La piridoxina se encuentra básicamente en alimentos ricos en proteínas, excelentes fuentes son pollo e hígado. Buenas fuentes son el jamón, pescado (atún, salmón, trucha, arenque), nueces y el maíz. Generalmente frutas y vegetales son fuentes pobres de piridoxina, aunque las arvejas, coliflor y bananas contienen cantidades considerables. También es sintetizada aunque en bajas cantidades por las bacterias intestinales.

A veces se prescribe para mejorar la capacidad de regeneración del tejido nervioso, para contrarrestar los efectos negativos de la radioterapia y contra el mareo en los viajes <sup>(9)</sup>.

TABLA 3. ALIMENTOS RICOS EN PIRIDOXINA <sup>(9)</sup>.

Alimento	mg/100g
Sardinas y boquerones frescos	0.96
Nueces	0.87
Lentejas	0.60
Viseras y despojos cármicos	0.59
Garbanzos	0.54
Carne de pollo	0.50
Atún y bonito fresco o congelado	0.46
Avellanas	0.45
Carne de ternera o cerdo	0.40
Plátanos	0.37

Cantidad recomendada por día: 1.60 – 2.00 mg

## 1.4. QUÍMICA DE RADIACIONES

### 1.4.1. CONCEPTOS BÁSICOS.

**Radiación gamma:** La radiación gamma son ondas electromagnéticas de origen nuclear los cuales son fotones de energía que viajan a la velocidad de la luz ( $c = 3.0 \times 10^{10}$  cm/s). La diferencia entre los rayos gamma y la luz visible, estriba en la diferente longitud de onda ( $\lambda$ ) o frecuencia ( $\nu$ ) que los caracteriza como se ilustra en el diagrama del espectro electromagnético (figura 4). Es común expresar la radiación en términos de longitud de onda, por lo que la relación entre longitud de onda y energía es:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz, y  $\lambda$  es la longitud de onda <sup>(10)</sup>.

Longitud de onda (Angstroms)	Radación	Uso	Energía
$10^{-4}$	Rayos C3smicos Sec.		100MeV
$10^{-3}$			10MeV
$10^{-2}$	Rayos Gamma	Terapia	1MeV
$10^{-1}$			100keV
$10^0$			10keV
$10$	Rayos X	Diagn3stico	1keV
$10^2$			100eV
$10^3$	UV		10eV
$10^4$	Visible	Energía Solar	1eV
$10^5$	Infra-Rojo	Calor	$10^{-1}$ eV
$10^6$			$10^{-2}$ eV
$10^7$			$10^{-3}$ eV
$10^8$			$10^{-4}$ eV
$10^9$		Radar	$10^{-5}$ eV
$10^{10}$		$10^{-6}$ eV	
$10^{11}$	Ondas de Radio	Televisi3n	$10^{-7}$ eV
$10^{12}$		$10^{-8}$ eV	
$10^{13}$		Radio	$10^{-9}$ eV
$10^{14}$			$10^{-10}$ eV
$10^{15}$			$10^{-11}$ eV
$10^{16}$			Corriente El3ctrica en Alambres

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 4. Espectro Electromagn3tico.  
(1 Angstrom = 0.1 nm)

**Química de Radiaciones:** La química de radiaciones estudia los efectos químicos producidos en un sistema por la absorción de radiación ionizante, esta incluye a la radiación electromagnética (rayos X y  $\gamma$ ), partículas ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $e^-$ ,  $p^+$  y  $n^0$ ).

Al pasar la radiación ionizante a través de la materia, esta interacciona con los electrones de las moléculas causando excitación y/o ionización de estas, así como también forma radicales libres.

El estudio fundamental de la Química de radiaciones esta dirigida a identificar las especies formadas, excitadas, ionizadas y radicales libres, producidas por efecto de la radiación en un sistema en particular. Estas especies pueden posteriormente reaccionar entre sí, o con otros solutos, hasta llegar a producir productos radiolíticos estables, para su análisis <sup>(10)</sup>.

**Radiación Ionizante:** La radiación ionizante es el tipo de radiación que tiene la energía suficiente para ionizar o excitar a los átomos con que interacciona. En esta se incluyen la radiación proveniente de núcleos radiactivos (rayos  $\gamma$  y partículas  $\alpha$  y  $\beta$ ), partículas de alta energía (electrones, protones, deuterones, etc.) y la radiación electromagnética de longitud de onda corta (como los rayos X, cuya longitud de onda es menor a 250 Å, esto es con una energía mayor a 50 eV <sup>(10)</sup>).

El principal efecto de la absorción de cualquier tipo de radiación ionizante en la materia es la ionización, excitación y disociación de moléculas. El proceso de absorción presenta tres tipos de interacción con la materia:

a) Efecto Fotoeléctrico .

El fotón incidente interacciona con el absorbedor como un paquete de energía que es completamente absorbido, ya que imparte toda su energía a un solo electrón orbital. La energía del fotón incidente se divide en: la energía cinética necesaria para vencer la energía de unión del electrón orbital y así expulsarlo de su orbital y en la energía que adquiere el fotoelectrón expulsado. El efecto fotoeléctrico es más factible que se lleve a cabo con energías del fotón incidente del orden de 0.1 MeV.

b) Efecto Compton.

Sucede con mayor probabilidad cuando el fotón incidente tiene una energía desde 0.6 hasta 5 MeV, e interacciona con un electrón orbital arrancándolo de su orbital sin gastar toda su energía en este proceso. El fotón incidente es dispersado y puede sufrir varias colisiones hasta ser finalmente absorbido por efecto fotoeléctrico. Este efecto es el más importante de la radiólisis del agua y en soluciones acuosas de compuestos orgánicos.

c) Formación de Pares.

Este proceso es el menos frecuente, pues el fotón incidente debe tener un mínimo de 1.02 MeV de energía, de esta forma interacciona con el campo eléctrico del núcleo o con el electrón produciendo un par electrón-positrón. Cualquier exceso de energía cinética de las dos partículas creadas, el electrón produce ionización y el positrón desaparece al interaccionar con un electrón produciendo dos rayos gamma de 0.51 MeV cada uno.

La radiación ionizante además de ser utilizada en la irradiación de alimentos, actualmente se utiliza también en: la modificación de polímeros, polímeros de injerto,

polímeros de recubrimiento, esterilización de productos médicos y manejo de desechos peligrosos.

**Radiólisis:** La radiólisis es la transformación de la materia causada o inducida por radiación ionizante <sup>(11)</sup>.

**Rendimiento Radiolítico o Valor G:** El valor G es una expresión comúnmente utilizada en Química de Radiaciones para cuantificar la extensión de los cambios químicos sufridos por un compuesto debido a la radiación ionizante, y se define como el número de especies químicas, ya sean moléculas, iones o radicales libres, que se transforman (cuyo caso se denota como G-) o que se forman (G) por cada 100 electrón-volts de energía absorbida por el sistema <sup>(11)</sup>.

$$G = \frac{\text{Número de especies químicas transformadas}}{\text{Dosis absorbida}} \times 100$$

Para efectuar el cálculo del valor G, la dosis deberá expresarse en electrón-volts por gramo (eV /g), o bien electrón-volts por mililitro (eV/mL) <sup>(10)</sup>.

**Valor G° o valor G inicial:** es el rendimiento radiolítico obtenido cuando la dosis absorbida tiende a cero. Se determina por la extrapolación en la gráfica del valor G en función de la dosis absorbida <sup>(10)</sup>.

**Unidades:** La dosis de radiación absorbida por un material que ha sido irradiado se expresa en términos de la cantidad de energía que este absorbe por unidad de masa. La unidad de dosis absorbida es el joule por kilogramo (J/kg), la cual ha sido denominada como gray (Gy), de tal manera que la dosis absorbida por un material se expresa en grays o bien, en algunos de sus múltiplos: kGy = 10<sup>3</sup> Gy, MGy = 10<sup>6</sup> Gy <sup>(12)</sup>.

La unidad antigua de dosis de radiación es el rad el cual fue definido como 1000 erg/g, de modo que 1 Gy es igual a 100 rad. Asimismo 1 Rad. = 6.241 x 10<sup>13</sup> eV/g.

La dosis absorbida por unidad de tiempo se denomina **intensidad de dosis absorbida** (o también razón de dosis absorbida) y es expresada en Gy/min o Gy/h.

**Poder de penetración de los rayos gamma:** El conocimiento del poder de penetración de la radiación es de importancia tanto para propósitos de aplicación, como para protección. Ver figura 5.

En un medio dado, el alcance de la radiación ionizante, los rayos gamma son los que presentan mayor poder de penetración. Estos pueden atravesar grandes distancias aun en un medio denso, por ejemplo se requiere un espesor de plomo de 15 centímetros para reducir su intensidad por un factor de 5000 <sup>(11)</sup>. El poder de penetración de los rayos gamma es de varias decenas de centímetros en alimentos.

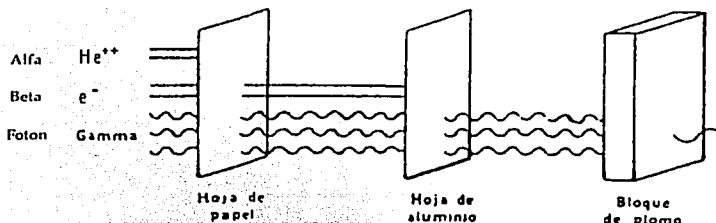


Figura 5. Poder de penetración relativo de las radiaciones alfa, beta y gamma.

Cuando la radiación gamma pasa a través de la materia sufre absorción por interacción con los átomos del material absorbente.

El resultado es un decremento en la intensidad de la radiación que está en función de la distancia recorrida a través del material absorbente y de la naturaleza del mismo. La ecuación del decremento en la energía del haz incidente de radiación es exponencial y se expresa:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\mu x$$

Donde :

$I_0$  = la intensidad del haz incidente de radiación

$I$  = la intensidad después de atravesar una distancia  $x$  a través del material

$\mu$  = coeficiente de atenuación lineal del material.

El coeficiente de atenuación lineal del material  $\mu$  es el valor que depende de la naturaleza del material absorbente y de la energía de la radiación, tiene unidades de  $\text{cm}^{-1}$ . Por ejemplo: Para una radiación de 1 MeV el valor de  $\mu$  para plomo, agua y aire, expresado en  $\text{cm}^{-1}$  es de 0.797, 0.0706 y de  $7.6 \times 10^{-5}$  respectivamente<sup>(10)</sup>.

**Radionúclido:** todo elemento que de manera espontáneamente emite cual tipo de radiación (beta, alfa, gamma) .

**Actividad:** la actividad es el número de emisiones (desintegraciones) de radiación que tiene un radionúclido en un segundo. La unidad de actividad esta dada en términos del inverso de un segundo ( $\text{s}^{-1}$ ) y se denomina Becquerel (Bq). La relación de un Becquerel con el Curie (Ci), que es la unidad anteriormente utilizada para la actividad es:  $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$  <sup>(12)</sup>.

## 1.4.2. RADIÓLISIS DEL AGUA.

El estudio de la radiólisis del agua es de importancia debido a que muchos de los sistemas estudiados son soluciones acuosas y que el agua constituye el componente principal de la mayoría de los sistemas biológicos, incluyendo a los alimentos.

Los mecanismos de su descomposición de las soluciones acuosas es complejo, por ello es necesario conocer la distribución espacial, los caminos formación, los rendimientos y las reacciones de los intermediarios responsables de los procesos finalmente observados. La secuencia de descomposición del agua se puede observar por tres etapas principales:

a) Etapa Física.

Tiene lugar de  $10^{-16}$  a  $10^{-14}$  segundos después de incidir la radiación gamma sobre las moléculas de agua, teniendo como resultado la excitación y/o ionización de éstas.

b) Etapa fisicoquímica.

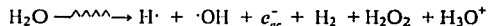
Tiene lugar de  $10^{-14}$  a  $10^{-12}$  segundos, durante esta etapa ocurre la combinación de moléculas ionizadas con una no ionizada, las moléculas excitadas se disocian cediendo energía, produciendo radicales y el electrón liberado durante la ionización se solvata.

c) Etapa Química.

Esta etapa consiste en la combinación y recombinación de los electrones, iones y radicales formados desde  $10^{-12}$  a  $10^{-7}$ .

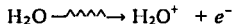
La acción química total de la radiación sobre el agua puede resumirse de la siguiente manera <sup>(13)</sup>:

~~~~~ → = exposición a la radiación.



El átomo de hidrógeno ( $\text{H}^\cdot$ ), el radical hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ), el ion hidrónio ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) y el electrón hidratado  $e_{ac}^-$  son considerados como las especies primarias de la radiólisis del agua y los principales responsables de los cambios químicos observados en las soluciones acuosas irradiadas.

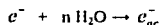
El evento primario es la ionización de la molécula de agua:



Los radicales hidroxilo y los iones hidrónio, derivan de los iones positivos formados durante el proceso de ionización:



El electrón que se libera de la molécula del agua, viaja a través del líquido chocando con otras moléculas, perdiendo su energía y quedando rodeado de moléculas de agua.



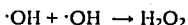
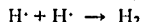
El electrón hidratado  $e_{ac}^-$  es un poderoso agente reductor y presenta una fuerte tendencia a unirse a átomos y moléculas, a las cuales reduce. Debido a su alta reactividad, su tiempo de vida es muy corto, del orden de nanosegundos. Los  $e_{ac}^-$  también se adicionan muy rápidamente a compuestos aromáticos, ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, tioles, bisulfuros, etc.

El átomo de hidrógeno es otro agente reductor que se produce en la radiólisis del agua, aunque a pH ácido es producido con un rendimiento menor que el electrón hidratado y es menos reactivo que este.

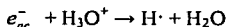
Las especies primarias de la radiólisis del agua ( $\text{H}\cdot$ ,  $\cdot\text{OH}$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $e_{ac}^-$ ) pueden reaccionar entre ellas dando lugar a un gran número de reacciones, entre las cuales esta la reformación de agua:



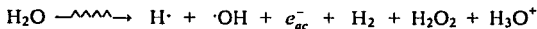
Y la efectuada entre especies idénticas, mediante las cuales se produce hidrógeno molecular ( $\text{H}_2$ ) y el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ):



También tiene lugar una reacción muy eficiente entre el electrón hidratado y el ion hidronio, que da como resultado la formación de hidrógeno atómico:



Estas reacciones se completan en 1 nanosegundo después de que pasa la radiación ionizante. La acción química total de la radiación sobre el agua puede resumirse de la siguiente forma:



Donde los números representan el rendimiento radioquímico (valor G) por cada 100 eV de energía absorbida, para cada especie formada <sup>(13)</sup>.

## 1.5. IRRADIACIÓN.

El tratamiento por irradiación es muy sencillo ya que simplemente consiste en exponer los alimentos empacados o a granel frente a una fuente de radiación ionizante durante el tiempo necesario para lograr el efecto técnico deseado. Las fuentes de radiación ionizante permitidas por la norma Codex para este tratamiento son:

- 1.- Radiación gamma proveniente de los radionúclidos de Cobalto - 60 (emisor de dos rayos  $\gamma$  con energías de 1.17 y 1.33 MeV).
- 2.- Electrones generados de máquinas con energías hasta de 10 MeV.
- 3.- Rayos X con energías hasta de 5 MeV.

La principal diferencia entre estos tipos de radiación es el poder de penetración, la radiación gamma o X puede penetrar hasta 30 centímetros en agua o en materiales de densidad muy similar mientras que los electrones pueden penetrar únicamente 0.5 cm por cada MeV de energía del haz, de tal manera que los electrones de 10 MeV pueden penetrar escasamente 5 cm.

La longitud de onda de la radiación ionizante es muy pequeña por lo tanto de muy alta energía, de tal forma que al interactuar con un material va a ser capaz de romper enlaces químicos y separar las moléculas en fragmentos más pequeños que pueden ser neutros (radicales libres) o con carga dado lugar a la formación de pares de iones, por esta razón es una energía ionizante <sup>(14)</sup>.

### 1.5.1. IRRADIADORES.

El diseño de los irradiadores ha sido en función de las necesidades, así por ejemplo los hay móviles que se pueden desplazar hacia los campos de cultivo agrícola, los relativamente pequeños en peso aproximado a 5 toneladas con auto blindaje de plomo y acero inoxidable conocidos como gammacell que se utilizan comúnmente en laboratorios de investigación científica en áreas medica, química, farmacéutica, física, biológica, etc., hasta los de tipo semi-industrial e industrial con capacidades de trabajo diario de varias toneladas de procesamiento de productos inorgánicos y orgánicos. Mientras que en los irradiadores tipo gammacell, la capacidad de irradiación es solo de muestras pequeñas pues la dimensión de la cámara de irradiación es del orden de 14 cm de altura y 8.9 cm de diámetro, con un campo de irradiación muy homogéneo lo que hace atractivo para fines de investigación. Generalmente la distribución de las fuentes en los irradiadores auto-blindados está de manera circular y fija. Además, la cámara de muestras es móvil y se desplaza de manera vertical o bien puede estar girando alrededor de las fuentes.

Los irradiadores de tipo industrial y los de tipo semi-industrial, pueden tener características propias dependiendo en los objetivos y necesidades.

Así por ejemplo en un irradiador semi-industrial, un rasgo importante es que puede variarse ampliamente la razón de dosis seleccionando la cantidad y altura de las fuentes necesarias para irradiar, esto lo hace muy atractivo en usarlo como gran apoyo de investigación y también en irradiación de productos industriales.



El material radioactivo es almacenado en una alberca de al menos 5 metros de profundidad, y sus paredes y pisos son recubiertos de concreto y camisa de acero inoxidable <sup>(14)</sup>.

### 1.5.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES Y EQUIPOS.

Casi todos los irradiadores gamma de uso industrial, guardan un diseño de instalaciones tal que permiten las mismas condiciones de operación y sistemas de alarmas para mantener la seguridad radiológica en la instalación radioactiva.

Así, un irradiador industrial o semi-industrial consta de las siguientes partes:

1. Alberca de almacenamiento de las fuentes de irradiación.
2. Cámara de irradiación.
3. Mecanismos para el movimiento de las fuentes.
4. Laberinto de acceso a la cámara de irradiación.
5. Consola de control.
6. Posición de las fuentes.
7. Cuarto de compresores de aire, filtro de aire, planta purificadora de agua para la alberca, y tableros de control.

Generalmente el grosor de las paredes que sirven de blindaje a la cámara de irradiación está diseñado de acuerdo a la capacidad máxima de carga de material radioactivo, así por ejemplo para una carga de  $1.85 \times 10^{16}$  Bq (50,000 Ci) de actividad semejante al que cuenta el Instituto de Ciencias Nucleares - UNAM, las paredes deben tener una densidad de concreto de  $2.39 \text{ gm/cm}^3$  y un ancho de 70 cm si es doble pared y en pared sencilla de 1.22 m en adelante.

El campo de exposición dependerá de la carga almacenada y la exposición exterior a la cámara de irradiación deberá estar dentro los límites establecidos por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias de México (CNSNS).

Para cuestiones de seguridad radiológica, los irradiadores auto-blindados como un Gammacell, estos deben cumplir los mismos requisitos que los de mayor capacidad de trabajo ya sea panorámicos o tipo alberca <sup>(14)</sup>.

### 1.5.3. FUENTES DE IRRADIACIÓN.

La fuente radiactiva empleada fue un irradiador de tipo semi-industrial de rayos gamma del radionúclido Cobalto-60 denominado Gammabeam-651 PT, que esta localizado en el Instituto de Ciencias Nucleares. Este equipo es operado individualmente con fuentes ensambladas, éstas son almacenadas en una piscina con agua y son elevadas con motores de aire, a una posición de irradiación en el cuarto blindado. El producto es expuesto a las fuentes a tiempos pre-determinados para obtener la dosis requerida.

Variaciones en la velocidad de dosis se pueden lograr por la pre-selección del número y posiciones de las fuentes expuestas y por la localización del producto con relación a las fuentes.

## 1.6. DOSIMETRIA DE LAS FUENTES DE IRRADIACIÓN.

La cuantificación de la dosis adsorbida por un sistema se determina por un dosímetro.

Los dosímetros se dividen en:

- Dosímetros Físicos (primario).
- Dosímetros químicos (Secundarios).

Para este caso se utilizó un dosímetro de tipo Químico llamado sulfato ferroso-cúprico o "Dosímetro de Fricke modificado". En el caso de la dosimetría Química la dosis de radiación se determina por el cambio Químico producido por un sustrato, que en nuestro caso es el ion ferroso.

El dosímetro ferroso-cúprico está constituido por una solución acuosa de sulfato ferroso amoniacal  $10^{-3}$  mol/L, sulfato cúprico  $10^{-2}$  mol/L y ácido sulfúrico  $5 \times 10^{-3}$  mol/L.

La dosis adsorbida se cuantifica con relación a los cambios en la concentración de los iones férricos formados, esta concentración de iones férricos es proporcional a la disminución de iones cúpricos por el ataque de la radiación ionizante. El análisis se realiza en un espectrofotómetro de ultra-violeta en 304 nm de longitud de onda.

Para obtener la dosis adsorbida es preciso utilizar la siguiente fórmula:

$$D = \frac{N\Delta(D.O.)10}{10^3 G(Fe^{3+})l f \rho \epsilon} \text{ Gy}$$

Donde:

$N$  es el número de Avogadro  $6.022 \times 10^{23}$  moléculas/mol

$\Delta(D.O.)$  es la diferencia entre la densidad óptica del dosímetro irradiado y sin irradiar.

$\epsilon$  es la absorptividad molar, que es  $216 \text{ m}^2 \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  en 25 °C.

$f$  el factor de conversión para transformar electrón volts por mililitro en Gy  $6.242 \times 10^{15}$ .

$\rho$  es la densidad de la solución dosimétrica de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $1.001 \text{ kg dm}^{-3}$

$l$  la longitud del paso óptico en cm, (1 cm).

$G(Fe^{3+})$  es el número de iones férricos formados por 100 eV de energía absorbida por el sistema bajo condiciones dadas. Para una celda de absorción de 1 cm  $G(Fe^{3+}) = 0.66$  moléculas/100 eV

Con todos estos datos la ecuación se reduce a:

$$D = 6480 \times \Delta(D.O.) \text{ Gy.}$$

Para el cálculo de la dosis se debe saber el valor G del producto estimado en la reacción, la cual es determinada comparando el sistema químico con alguno de los dosímetros absolutos<sup>(15, 12)</sup>.

La dosis a utilizar se obtiene de la media o el promedio de mediciones realizadas a diferentes intervalos de tiempo, en este estudio se realizaron mediciones a 60, 45, 30 y 15 minutos.

## **1.7. LA IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS.**

El abastecimiento de alimento ha sido siempre una de las principales preocupaciones del ser humano. Las técnicas de conservación de alimentos de las cuales se valió para lograr dicho abastecimiento fueron superadas por un aumento desproporcionado de la población, por lo cual surgió la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de conservación de alimento que abrieran otras posibilidades.

Dentro de las técnicas más recientes propuestas se encuentran el empleo de radiación ionizante como una alternativa para conservar la calidad de los alimentos y prolongar así su vida de almacenamiento así como disminuir la incidencia de las enfermedades causadas por los alimentos.

El tratamiento de alimentos con radiación se basa en la capacidad que posee esta para destruir células, pues se sabe que la disminución de la calidad de los alimentos durante su almacenamiento es el resultado tanto de los procesos fisiológicos, químicos y bioquímicos propios de los alimentos así como el deterioro causado por microorganismos, insectos y demás parásitos. La acción letal de la radiación se lleva a cabo cuando la radiación ionizante interacciona con el agua y demás constituyentes del alimento, y da como resultado la formación de especies reactivas que tiene la capacidad de reaccionar con el ácido desoxirribonucleico (DNA), alterando su estructura de tal manera que la división celular se ve inhibida<sup>(16)</sup>.

### **1.7.1. PROCEDIMIENTO PARA LA IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS.**

La irradiación es un proceso físico de tratamiento de alimentos, el cual involucra la exposición del alimento, ya sea empacado o a granel, a la acción de radiación ionizante. Los tres tipos de radiación ionizante que se emplean en el procesamiento de alimentos son los rayos  $\gamma$ , electrones acelerados en máquinas especiales y los rayos X.

Este proceso se lleva a cabo en un cuarto o cámara de irradiación de características especiales para tal efecto durante un tiempo determinado. Las fuentes de rayos  $\gamma$  y más comúnmente utilizadas en el procesamiento de alimentos son aquellas que usan Cobalto-60 y Cesio-137.

## **1.8. DOSIS DE IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS.**

Por otro lado, el efecto de la radiación en el alimento esta en función de la cantidad de energía que absorbe, esta cantidad es la dosis de irradiación. Según sea el tipo

de alimento y la dosis aplicada, es el objetivo técnico que se alcanza. De acuerdo a los cálculos realizados, el consumo de energía por pasteurización o por esterilización por calor es mucho más alto que el requerido por irradiación. Se ha concluido que existe un ahorro de energía en los alimentos tratados por irradiación y como el aumento de temperatura no alcanza a calentar el producto, el proceso de irradiación se le ha dado el nombre de esterilización en frío.

Es importante observar que dosis relativamente bajas producen la mortalidad de los insectos y con una diferencia mayor de dosis se empiezan a destruir las bacterias, con un diferencial mayor, los virus y realmente se requieren de dosis mucho mayores para empezar a destruir la composición de un alimento, por lo que se comprueba la efectividad de que la radiación aniquila microorganismos, sin destruir su potencial nutrimental del alimento <sup>(16)</sup>.

A continuación se mencionan algunas de las principales aplicaciones de la irradiación de alimentos:

### 1.8.1. DESINFECCIÓN POR INSECTOS.

En la actualidad se pierden grandes cantidades de la producción mundial de granos y productos de granos debido a la ingestación por insectos. Tradicionalmente este problema se ha resuelto con el empleo de insecticidas químicos como el óxido de etileno, bromuro de metilo y dibromuro de etileno, los cuales desgraciadamente no están libres de riesgos. El óxido de etileno ha sido ampliamente utilizado en la desinfección de fruta, este gas, sin embargo, es potencialmente carcinógeno y ha sido prohibido en muchos países. Una alternativa para la desinfección de granos y frutas es la irradiación. Con el empleo de esta técnica se matan o esterilizan los insectos y se previene el desarrollo de sus larvas y huevecillos. Además se tiene la ventaja de que se puede aplicar a través del material de empaque de manera que la fruta puede ser pre-empacada y los granos pueden ser colocados en sacos sellados de manera que se evita la re-infestación. La dosis necesaria para controlar la infestación en frutas es de 0.1 a 0.3 kGy. En cereales como trigo y arroz los insectos se controlan con dosis de 0.2 a 0.5 kGy <sup>(18)</sup>.

### 1.8.2. PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES CAUSADAS POR ALIMENTOS.

La irradiación de los alimentos como las carnes de aves, cerdo y pescado, combinado con prácticas más higiénicas en el manejo de estos productos puede reducir significativamente la incidencia de enfermedades diarreicas cuyo vehículo de transmisión del agente causante son los alimentos. Uno de los microorganismos que más daño causan es la bacteria Salmonella, que se encuentra comúnmente en carne y productos cárnicos, así como en huevo, pescados, mariscos y alimento para ganado. El tratamiento de estos productos con 3 kGy puede reducir la Salmonella viable por un factor de un millón por lo menos. También se puede encontrar contaminando los alimentos, bacterias como Shigella, Staphylococcus Aureus, Clostridium Perfringens, Campylobacter, Yersinia, Escherichia Coli, entero patógena y Lysteria. Un tratamiento de radiación con una dosis de entre 2 y 7 kGy, dependiendo del producto puede causar una reducción sustancial en el

número de microorganismos patógenos viables que ocasionalmente contaminan los alimentos<sup>(19)</sup>

### 1.8.3. EXTENSIÓN DEL PERIODO DE ALMACENAMIENTO.

La radiación puede ser empleada con el propósito de alargar el periodo de almacenamiento de productos frescos como frutas y hongos comestibles, ya que por una parte afecta los procesos bioquímicos que se llevan a cabo en estos, disminuyendo así la aparición de la madurez. La radiación ionizante, también destruye levaduras y otros microorganismos que comúnmente contaminan la fruta fresca y que son los que causan la podredumbre cuando la fruta se madura. Además, puede evitarse la desecación que es otro factor que causa deterioro en los productos frescos, ya que a pesar de que la radiación no previene este proceso, puede ser aplicada a un producto ya empacado de tal manera que la combinación adecuada del empacado y la radiación conduzca a una considerable extensión de la vida útil para una amplia variedad de alimentos frescos. Ejemplos de éstos son fresas, hongos comestibles, peras, carnes cocidas, tocino, ensaladas. La dosis de radiación que se requiere para este propósito se encuentra entre 0.5 y 3 kGy<sup>(18)</sup>

### 1.8.4. INHIBICIÓN DE BROTES.

La inhibición de brotes (hijuclos) en vegetales de raíz frescos tales como la papa, cebolla, ajo, es llevada a cabo por el tratamiento con radiación a dosis bajas, comprendidas entre 20 y 150 Gy. La radiación así empleada causa suficiente daño al DNA de las células latentes de los brotes que después de ser irradiados son incapaces de dividirse para producir el brote. Las cebollas y las papas tratadas con radiación pueden ser almacenadas a temperatura ambiente ahorrando energía al no requerir un almacenamiento bajo refrigeración<sup>(18)</sup>.

### 1.8.5. DESTRUCCIÓN DE PARÁSITOS.

Otro propósito del empleo de radiación en alimentos, concierne al parásito triquina, el cual se encuentra en la carne de cerdo y es el causante de la triquinosis, la cual constituye un problema de salud. Una dosis de radiación 0.2 a 0.3 kGy inhibe la maduración de los huevecillos de la triquina<sup>(18)</sup>.

### 1.8.6. DESCONTAMINACIÓN DE ESPECIAS.

Las hierbas secas y especias se encuentran generalmente con niveles de contaminación elevados. El tratamiento de éstas con radiación presenta una alternativa

ventajosa al empleo de óxido de etileno. Este tratamiento se lleva a cabo empleando dosis en el intervalo de 7 a 10 kGy <sup>(19)</sup>.

En lo que respecta a los cambios químicos que sufren los alimentos en el proceso de irradiación, están los aspecto toxicológico de los productos radiolíticos de los alimentos dentro de los cuales se a encontrado:

1. Los productos radiolíticos identificados no presentan características toxicas significativas.
2. La cantidad de cada producto radiolítico es pequeña, en niveles con dosis de mas de 50 kGy. Este nivel bajo de incidencia es significativo en la limitación de cualquier potencial tóxico de los productos radiolíticos.
3. El incremento de cada producto radiolítico esta en función de la dosis y esta relacionado con las condiciones de irradiación, que afectan principalmente la acción indirecta de la radiación.
4. Algunos productos radiolíticos anteriormente identificados pueden encontrarse en alimentos no irradiados y no únicamente en alimentos irradiados.

### 1.9. RADIÓLISIS DE LAS VITAMINAS.

La estabilidad a la irradiación de las vitaminas presentes en los alimentos tratados es importante desde el punto de vista de la nutrición. La radiosensibilidad de las diferentes vitaminas depende mucho de la naturaleza y la composición del sistema alimenticio. Se han llevado a cabo numerosos estudios referentes a los cambios del contenido de las vitaminas provocados por la irradiación pero ha habido relativamente pocos intentos encaminados a identificar y cuantificar los productos de degradación de las vitaminas formados en la irradiación de soluciones simples o en alimentos.

La siguiente tabla muestra la estabilidad de diferentes vitaminas a la acción de diferentes agentes como son el calor, la presencia de oxígeno, la luz y la radiación ionizante <sup>(20)</sup>.

TABLA 4. ESTABILIDAD DE LAS VITAMINAS FRENTE A VARIOS AGENTES

| Vitamina                       | Calor | Oxígeno | Luz   | Radiación Ionizante |
|--------------------------------|-------|---------|-------|---------------------|
| <b>Vitaminas Hidrosolubles</b> |       |         |       |                     |
| Acido ascórbico                | 0     | ++      | +     | ++                  |
| Tiamina                        | ++    | 0 o +   | 0 o + | ++                  |
| Riboflavina                    | 0     | 0       | ++    | 0                   |
| Acido nicotínico               | 0     | 0       | 0     | 0 o +               |
| Acido pantoténico              | +     | 0       | 0     | 0                   |
| Piridoxina                     | 0     | 0 o +   | +     | +                   |
| Biotina                        | +     | 0       | 0     | 0                   |
| Acido fólico                   | +     | +       | +     | 0                   |
| Vitamina B <sub>12</sub>       | 0     | +       | +     | ++                  |
| <b>Vitaminas Liposolubles</b>  |       |         |       |                     |
| Vitamina A                     | 0 o + | +       | +     | ++                  |
| Vitamina D                     | 0     | 0 o +   | 0     | 0                   |
| Vitamina E                     | 0     | ++      | 0 o + | ++                  |
| Vitamina K                     | 0     | 0       | +     | + o ++              |

0 = estable, + = medianamente sensible, ++ = muy sensible.

### 1.9.1. RADIÓLISIS DE LA TIAMINA.

En varios estudios se ha observado que la tiamina, junto con la vitamina B<sub>12</sub> (cianocobalamina) son las más sensibles a la radiación ionizante de las vitaminas del complejo B, tanto en solución acuosa como en alimentos<sup>(17, 21)</sup>. En general, las pérdidas de tiamina son mayores al irradiar soluciones acuosas que las ocurridas en la irradiación de alimentos. Las pérdidas en estos varían de forma notable, dependiendo de diversos factores como son, el tipo de alimento irradiado, las condiciones de irradiación (dosis, intensidad de dosis, tipo de radiación, temperatura, medio ambiente) y el tratamiento posterior de los alimentos irradiados (almacenamiento, cocinado, enfriado).

En solución acuosa, los estudios realizados muestran que los factores que más afectan la descomposición radiolítica de la tiamina son: concentración de vitamina, pH, dosis de radiación, así como la presencia de otras sustancias.

Se han encontrado que las pérdidas de tiamina en soluciones diluidas están estrechamente relacionadas a su concentración. En soluciones acuosas saturadas con aire a una dosis de 5 kGy, las pérdidas encontradas fueron: A una concentración de  $0.5 \times 10^{-3}$  mol/L la pérdida de tiamina fue del 68.5 %, para una solución  $2.0 \times 10^{-3}$  mol/L, la pérdida fue del 49.5 % y para una concentración  $15 \times 10^{-3}$  mol/L, la pérdida fue del 16.6 %, como se ve, la descomposición disminuye al aumentar la concentración<sup>(21)</sup>.

Se ha observado que existen sustancias que protegen a las vitaminas de la descomposición causada por la irradiación gamma. El glutatión minimiza la pérdida de tiamina por irradiación. El empleo de glucosa 0.1 M en soluciones acuosas saturadas con O<sub>2</sub> o N<sub>2</sub>O logra la completa protección de las soluciones de vitaminas irradiadas hasta una dosis de 0.5 kGy. En ausencia de glucosa, la tiamina es destruida casi totalmente a 25

kGy. A dosis de 5 kGy, la pérdida de tiamina fue del 72 % sin glucosa y del 33 % con glucosa. También la tiourea y el triptofano demostraron actuar efectivamente como protectores de la destrucción de la tiamina por irradiación <sup>(21)</sup>.

Aun cuando se sabe que la irradiación gamma causa destrucción de la vitamina B<sub>1</sub>, no se han logrado elucidar las reacciones que están involucradas. Se sabe que ambos anillos que forman la molécula de tiamina reaccionan fácilmente con los electrones, pero solo el anillo de tiazol reacciona con los radicales hidrogeno, los radicales oxidantes como el hidroxilo se adicionan a ambos anillos. Se supone que el paso inicial en su degradación es el rompimiento de la unión entre los anillos tiazol y pirimidina. Sin embargo, la presencia de los productos resultantes de este rompimiento no se ha hecho evidente <sup>(22)</sup>.

### 1.9.2. RADIÓLISIS DE LA RIBOFLAVINA.

Las moléculas de Riboflavina contienen varios sitios susceptibles al ataque de especies reactivas, tales como el electrón hidratado y cuando son irradiadas en solución acuosa sufre una degradación extensiva (ver tabla 5) <sup>(20)</sup>.

TABLA 5. ESTABILIDAD A LA RADIACION GAMMA DE LA RIBOFLAVINA EN SOLUCION ACUOSA <sup>(19)</sup>.

| Dosis (kGy) | Pérdida (%)           |
|-------------|-----------------------|
| 0.27        | 100 (conc.: 1 µg/ml)  |
| 1.00        | 90 - 93               |
| 2.00        | 100                   |
| 5.00        | 78 (conc.: 100 µg/ml) |
| 5.00        | 68 (conc.: 50 µg/ml)  |

La radiólisis de la Riboflavina se dice que ocurre en tres pasos:

- 1.- Remueve el grupo ribitol.
- 2.- Forma el radical iso-aloxazine
- 3.- Sufre el decaimiento del radical iso-aloxazine.

La radiólisis de la Riboflavina es fuertemente dependiente de la energía de radiación. Radiaciones bajas como de 50 Gy no tienen prácticamente efecto, pero una dosis de 4 kGy de radiación causa una pérdida del 100 %. Con respecto a la posible degradación de los productos, la irradiación de soluciones acuosas de Riboflavina con rayos X, da por resultado una posible reducción a lumicromo y una también posiblemente la formación de leucoflavina <sup>(20)</sup>.



La Riboflavina parece ser mucho más resistente cuando se presenta en productos alimenticios que en solución acuosa, como se ve en la tabla 6. Esto no es sorprendente pues la Riboflavina esta unida a proteínas, como los grupos prostéticos, que generalmente la protegen del ataque directo o indirecto de la radiación ionizante.

TABLA 6. ESTABILIDAD A LA RADIACION DE LA RIBOFLAVINA EN VARIOS ALIMENTOS <sup>(20)</sup>

| Productos               | Dosis (kGy)  | Perdida (%) |
|-------------------------|--------------|-------------|
| Leche                   | 0.24         | 24          |
| Leche                   | 0.30         | 40          |
| Leche                   | 0.96         | 47          |
| Leche                   | 1.00         | 74          |
| Leche fortificada       | 0.050 - 1.00 | 3 - 16      |
| Leche evaporada         | 1.00         | 30 - 40     |
| Carne                   | 2.79         | 8 - 10      |
| Carne de res            | 3.00         | 10 - 17     |
| Bacalao                 | 0.60         | 6           |
| Huevos                  | 0.50 - 5.00  | 0           |
| Levadura                | 1.00         | 0           |
| Levadura                | 3.00         | 0           |
| Trigo y harina de trigo | 0.02 - 0.15  | 0           |

### 1.9.3 RADIÓLISIS DE LA PIRIDOXINA.

Estudios hechos sobre la estabilidad a la radiación de la piridoxina, dan por resultado su mayor resistencia a la radiación gamma, es resistente a dosis de hasta 1 kGy en soluciones con pH de 7 y permanece casi intacta en suplementos de leche fortificada. Aunque es reportada más sensible a la radiación que la vitamina C.

Aunque hay estudios sobre los efectos de dosis grandes de mas de 10 kGy y estas indican una perdida similar a la que presenta la Tiamina. Otros estudios nos indican perdidas desde 0 en trigo irradiado a dosis de 2 kGy y almacenado por tres meses, a perdidas del 13 % y 16 % en bacalao y caballa, respectivamente, irradiadas a una dosis de 1 kGy <sup>(17)</sup>.

A continuación presentamos en la tabla 7, algunos productos que contiene piridoxina y su porcentaje de pérdida con respecto a la dosis aplicada<sup>(20)</sup>.

· TABLA 7. ESTABILIDAD A LA RADIACIÓN DE LA PIRIDOXINA EN DIVERSOS ALIMENTOS.

| Productos           | Dosis (kGy) | Perdida (%) |
|---------------------|-------------|-------------|
| Hígado              | 2.79        | 0           |
| Hígado              | 5.58        | 12          |
| Carne de res        | 3.0         | 21-25       |
| Carne de cerdo      | 3.0         | 10          |
| Salchichas de cerdo | 3.00        | 10          |
| Pollo fresco        | 2.79        | 32          |
| Pollo fresco        | 5.58        | 37          |
| Trigo               | 0.02        | 2.4         |
| Trigo               | 0.20        | 2.9         |
| Levadura            | 2.0         | 0           |

## OBJETIVOS.

- \* El objetivo principal es determinar la descomposición de la tiamina, riboflavina y piridoxina en solución acuosa diluida y libre de oxígeno, sometidas a diferentes dosis de irradiación gamma.
- \* Lograr una buena separación de los productos radiolíticos y las vitaminas para poder cuantificar adecuadamente su descomposición. La cual se realiza utilizando cromatografía de líquidos de alta resolución.
- \* Determinar el rendimiento radiolítico (valor G y el valor G° inicial) de descomposición de las vitaminas estudiadas.
- \* Cuantificar la variación de la concentración inicial en función de la dosis absorbida en cada una de las vitaminas.

## PARTE EXPERIMENTAL.

### 2.1. REACTIVOS.

A continuación se enlista los reactivos utilizados, que fueron usados sin previa purificación:

Tiamina (B<sub>1</sub>) de Sigma, lote 72H0102.  
Riboflavina (B<sub>2</sub>) de Sigma, lote 29HC700.  
Piridoxina (B<sub>6</sub>) de Aldrich, lote 10027BQ.  
Ácido sulfúrico de Sigma, lote 10K3085.  
Sulfato ferroso amoniacal de Sigma lote 10K0222.  
Sulfato cúprico de Sigma lote 70K3700.  
Ácido 1-hexano sulfónico su sal de sodio de Aldrich.  
Metanol de Aldrich.  
Ácido acético de Merck.

Todos los demás reactivos utilizados fueron de la más alta pureza (grado analítico) y se utilizaron sin proceso de purificación adicional.

### 2.2. PREPARACION DE MUESTRAS

Los estudios de Química de Radiaciones requiere de cuidados mas detallados en la pureza del agua, limpieza de los contenedores para irradiación y preparación de las soluciones, pues involucra el comportamiento de las diversas especies reactivas presentes en muy bajas concentraciones (milimolares o mucho mas pequeñas), cualquier impureza presente compite con las especies reactivas o con los solutos y puede influenciar los resultados obtenidos.

El agua usada en los experimentos fue obtenida mediante un purificador compacto Milli-Q Plus Water System que pasa por un proceso de desmineralización y desionización en cartuchos que contienen resinas de intercambio iónico grado nuclear para remover los iones inorgánicos, un filtro de carbón activado para remover disolventes orgánicos, un cartucho de capturadores orgánicos para remover trazas orgánicas.

Los cuidados excesivos en la purificación del agua utilizada deben de acompañarse de iguales cuidados en los contenedores para la irradiación. En primer lugar, se lava con detergente y agua corriente, posteriormente se sumerge en una mezcla de ácido nítrico-ácido sulfúrico (ambos concentrados y en una proporción 1:3) durante una hora y se enjuagan, primero con agua destilada, se seca a temperatura ambiente y finalmente se ponen en la mufla a una temperatura entre 300° y 350° por 30 minutos como mínimo.

Los contenedores para la irradiación que se emplearon consisten de viales de vidrio de 1.3 cm de diámetro y 15 cm de largo.

La eliminación del aire de las soluciones se realizó utilizando gas argón el cual era inyectado a través de una trampa de vidrio a los viales utilizados conteniendo estos la solución a irradiar, el gas argón desplaza al aire, en un tiempo aproximado de 10 minutos.

Después eran colocadas a una distancia de 40 cm del vértice donde están localizadas las fuentes de irradiación, para recibir una razón de dosis de 2.1 kGy/h.

### 2.3. ANALISIS DE LAS MUESTRAS IRRADIADAS.

Después de la irradiación, las muestras de las diferentes vitaminas (tiamina, riboflavina y piridoxina) se analizaron en cromatografía de líquidos de alta resolución, para poder determinar el porcentaje de pérdida de cada una, en comparación a la dosis de irradiación recibida.

Además, con esto saber cual vitamina era mas sensible a la acción de la radiación en comparación con las otras dos, al conocer los porcentajes de pérdida de las diferentes vitaminas y su valor G.

### 2.4. COMPONENTES DEL IRRADIADOR GAMMABEAM-651 PT .

- Un blindaje a la radiación
- Fuentes de radiación de Cobalto-60
- Mecanismos de operación de las fuentes
- Mesa giratoria para los productos
- Consola de control de la instalación eléctrica e interruptores
- Piscina de almacenamiento de las fuentes.

El blindaje de radiación es diseñado para una fuente de cobalto-60 con una carga de  $7.4 \times 10^{15}$  Bq (200,000 Ci). La construcción esta hecha de bloque y concreto cuya densidad es de  $2.36 \text{ gm/cm}^3$ .

El sistema de seguridad del irradiador esta constituido por los siguientes dispositivos, que se muestran en la figura 6:

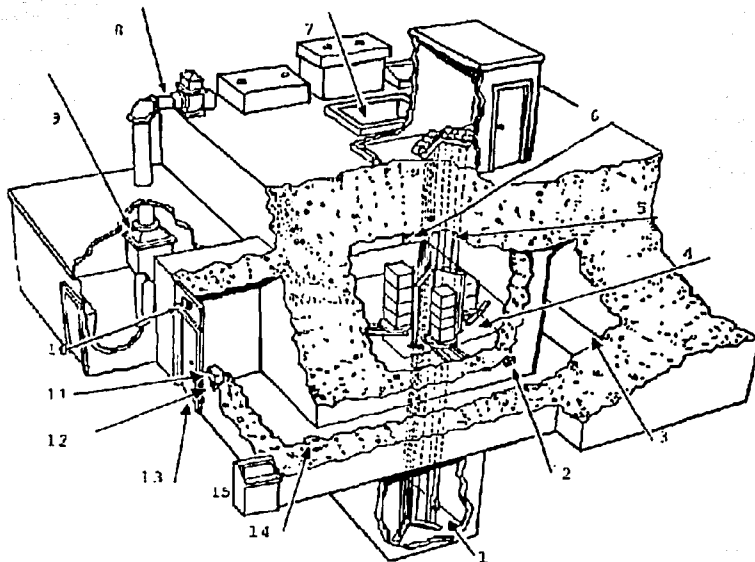


Figura 6. componentes principales del irradiador GAMMABEAM-651 PT

- 1 Piscina de agua desionizada para blindaje biológico.
- 2 Detector de radiación L118
- 3 Cable manual de emergencia.
- 4 Interruptor para flotador de nivel de agua.
- 5 Dispositivo para control de tope de cables de acero.
- 6 Interruptor de llave de seguridad.
- 7 Interruptor de nivel del tapón del techo de la cámara de irradiación.
- 8 Extractor de ozono.
- 9 Filtros para ventilación y detector óptico contra-incendios.
- 10 Luz de advertencia de presencia de alto nivel de radiación.
- 11 Indicador de nivel de radiación y alarma L118 exterior.
- 12 Interruptor de llave y fuente radioactiva de prueba.
- 13 Puerta de acceso de cerrado electromecánico.
- 14 Interruptor general de movimiento de las fuentes.
- 15 Consola de control.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Para el tratamiento del agua que recircula continuamente hacia la piscina, existen resinas de intercambio aniónica y catiónica y un filtro de carbón activado, con ello se regenera y desmineraliza el agua, esto evita la corrosión de los dispositivos y de las paredes de la piscina debido a los ácidos que se forman en la piscina al irradiar el agua.

Las resinas generalmente están en tanques de acero inoxidable muy bien sellados, junto existen también detectores de radiación para bajo nivel de exposición, de esta forma cualquier contaminación proveniente de la piscina (muy poco probable) sería detectada y pararía el sistema de trabajo del irradiador, en consecuencia las fuentes irían a su posición de blindaje biológico y pararía automáticamente el extractor de ozono.

Los controles de cualquier falla en la operación correcta del sistema auxiliar o del propio irradiador (lo cual pararía el ciclo de trabajo programado), están en la consola de control remoto.

Estos indicadores de falla han contribuido enormemente a evitar cualquier accidente de consecuencias graves, o al menos advertirlos, en que se tenga involucrado el material radiactivo y desde luego el factor humano es muy importante. Los indicadores de falla y el sistema de seguridad en los irradiadores, son alimentados también por una planta de luz de emergencia a falta de corriente eléctrica.

Las fuentes de Cobalto 60 se encuentran doblemente encapsuladas en recipientes AECL tipo C-188 de acero inoxidable llamadas comúnmente "lápiz". Cada lápiz tiene 45.15 cm de largo con un diámetro de 1.11 cm, con sellos al final de la cápsula y separadores entre cada uno de los depósitos de material de Cobalto- 60 dentro de la cápsula (lápiz). Cada fuente lápiz C-188 puede contener arriba de  $3.7 \times 10^{14}$  Bq (10,000 Ci) de Cobalto-60. EL peso total de Cobalto por lápiz es de 105.6 gramos. Cada lápiz es identificado por una serie de números y su posición en el arreglo para una identificación en su posición.

El almacenamiento de las fuentes en la piscina consiste de una tapa sobre la piscina de agua, que es el piso del cuarto de irradiación. Cuando las fuentes son bajadas a la posición de blindaje biológico (5 metros por debajo del nivel del piso). El campo de radiación que incide dentro del cuarto de irradiación no debe ser mayor 0.25 mR/hr. El campo de radiación de las fuentes es continuamente monitoreado cuando las fuentes están en su posición de blindaje biológico <sup>(3)</sup>.

## 2.5. CROMATOGRAFÍA DE LÍQUIDOS DE ALTA RESOLUCIÓN.

### INSTRUMENTO

Para el análisis de las muestras de vitaminas que se irradiaron, se utilizó un Cromatógrafo de Líquidos de Alta Resolución de la marca Agilent serie 1100, el cual consta de un gabinete donde se almacena la fase móvil, un degasador (con una velocidad de flujo máximo de 10 mL/min por canal, teniendo este equipo 4 canales) que elimina de gases a la fase móvil antes de ser pasada esta a la bomba de impulsión, esta opera a un rango de flujo de 0 hasta 10 mL/min, con incrementos mínimos de 0.001 mL/min, el intervalo de operación para la presión es de 0 a 400 bar. También consta de un muestreador, donde se colocan los viales de donde se toman las muestras respectivas de

los viales, se puede hacer una inyección desde 0.1 a 100 $\mu$ L de volumen de muestra. Después esta muestra se mezcla con la fase móvil a una columna de marca Hypersyl C-18 ODS de 150 mm de largo por 4.6 mm de diámetro, las cuales son analizadas por un detector de luz visible-ultravioleta, con arreglo de diodos y con un intervalo de longitud de onda que va de 190 a 950 nm.

Estas señales son transmitidas al equipo de computo con un programa auto ejecutable denominado HP Chem Station, que contiene los instrumentos de control y el sistema de evaluación de datos. Además de almacenar los datos en archivos individuales de cada una de las corridas hechas, la integración del área bajo la curva, especifica el tiempo de retención y la longitud de onda a la cual se trabaja. Desde aquí se puede manipular todas las funciones existentes en el instrumento.

## 2.6. PROCEDIMIENTO.

Primero se elaboró una curva patrón de las diferentes vitaminas (Tiamina, Riboflavina y Piridoxina) para lo cual se prepararon soluciones acuosas de estas en las siguientes concentraciones.

### 1. Tiamina.

Se prepararon soluciones con la siguiente concentración  $1 \times 10^{-3}$ ,  $8 \times 10^{-4}$ ,  $6 \times 10^{-4}$ ,  $4 \times 10^{-4}$  y  $2 \times 10^{-4}$  mol/L se inyectaron cada una por separado en el cromatógrafo. Para cada muestra se registro el tiempo de retención y el área bajo la curva de la señal obtenida a 246 nm. Se trazo una grafica de Tiamina vs. Área bajo la curva. Con los datos obtenidos se realizó un estudio estadístico (de por lo menos 3 experimentos diferentes) para obtener el mejor valor de la pendiente a ser utilizado en la cuantificación de la descomposición de la tiamina.

A continuación se prepararon soluciones acuosas de Tiamina de concentración  $1 \times 10^{-3}$  mol/L y se irradiaron en dosis que van desde 0.35 hasta 2.10 kGy.

Posteriormente estas muestras se inyectaron en el cromatógrafo y se cuantificó la perdida de concentración de la tiamina y posteriormente se graficó Dosis vs. Concentración y se determinó tanto el porcentaje de perdida de la vitamina y su valor G para cada dosis. Finalmente se graficó el valor G contra la dosis y se obtuvo el valor  $G^0$ .

### 2. Riboflavina.

De la misma manera se elaboró una curva patrón preparando soluciones de Riboflavina desde una concentración de  $1 \times 10^{-4}$ ,  $8 \times 10^{-5}$ ,  $6 \times 10^{-5}$ ,  $4 \times 10^{-5}$  y  $2 \times 10^{-5}$  mol/L, se usó una concentración menor en este caso por que su solubilidad es menor a la que presentan la Tiamina y Piridoxina. Inyectando cada una de estas en el cromatógrafo. Siguiendo el procedimiento anterior se registraron los tiempos de retención y el área bajo la curva de la señal obtenida a 268 nm. Se trazo una grafica de Concentración de Riboflavina vs. Área bajo la curva.



Posteriormente se prepararon soluciones con una concentración de  $1 \times 10^{-4}$  mol/L. Irradiándolas con dosis desde 0.35 a 2.10 kGy. Estas muestras se inyectaron en el cromatógrafo y se obtuvieron los datos del área bajo la curva, con ellos se determinó el % de pérdida y el valor G para cada dosis. Finalmente se graficó el valor G contra la dosis y se obtuvo el valor  $G^0$  de la descomposición de la riboflavina.

### 3. Piridoxina

Siguiendo el mismo procedimiento se elaboró la curva patrón, con soluciones acuosas con la siguiente concentración:  $1 \times 10^{-3}$ ,  $8 \times 10^{-4}$ ,  $6 \times 10^{-4}$ ,  $4 \times 10^{-4}$  y  $2 \times 10^{-4}$  mol/L. Para cada una de estas muestras se registró el tiempo de retención y el área bajo la curva de la señal obtenida a 293 nm.

Se preparó una solución de  $1 \times 10^{-3}$  mol/L. Irradiándola a dosis desde 0.35 a 2.10 kGy. Estas se inyectaron en el cromatógrafo y se continuó con el mismo procedimiento para determinar el porcentaje de pérdida, el valor G en cada dosis y el valor  $G^0$  para la piridoxina.

## RESULTADOS Y DISCUSION.

### 3.1. RESULTADOS DE LA TIAMINA.

La figura 7 muestra el cromatograma de tiamina obtenido por cromatografía de líquidos de alta resolución (CLAR) a diferentes longitudes de onda, así como su tiempo de retención que fue de 10.1 minutos. Las determinaciones se realizaron a 246 nm.

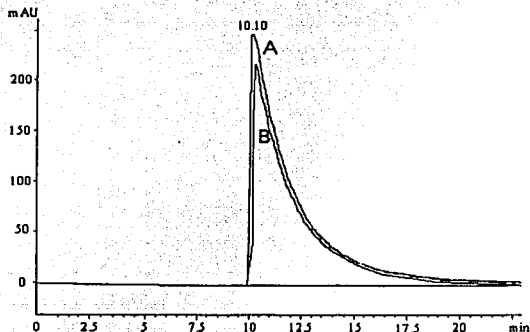


Figura 7. - Cromatograma de tiamina obtenido a: A-246nm y B-258 nm.

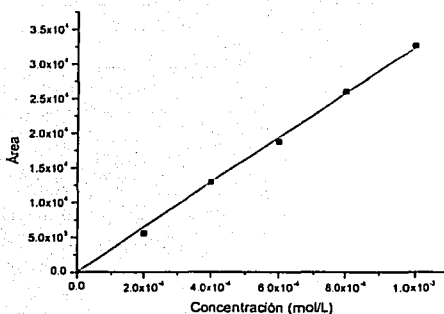
#### 3.1.1. CURVA PATRÓN DE TIAMINA POR CROMATOGRFÍA DE LÍQUIDOS DE ALTA RESOLUCIÓN.

En la tabla 8, se muestra los datos de la curva patrón de tiamina, cada valor representa el promedio de tres o más mediciones de diferentes muestras con la misma concentración usando el área bajo la curva del cromatograma como el que se presenta en la figura 7.

Los datos de la tabla 8 se introdujeron al programa de computo Origin 6.1, del cual se obtuvo la pendiente de la recta de la Figura 8 con un coeficiente de correlación de 0.9982, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\text{Concentración} = 32236363 \times \text{área bajo la curva} \pm 352565$$

Esta relación se utilizó para calcular las concentraciones de las muestras que se expusieron a un determinado tratamiento de irradiación a diferentes periodos de tiempo.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 8. Curva patrón de tiamina por cromatografía de líquidos a alta resolución determinada a 246 nm.

TABLA 8. DATOS DE LA CURVA PATRÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE TIAMINA Y SUS ÁREAS BAJO LA CURVA DEL CROMATOGRAMA OBTENIDO A 246 NM.

| Concentración (mol/L) | Área (mUA)      |
|-----------------------|-----------------|
| $1 \times 10^{-3}$    | $32621 \pm 385$ |
| $0.8 \times 10^{-3}$  | $25992 \pm 403$ |
| $0.6 \times 10^{-3}$  | $18731 \pm 335$ |
| $0.4 \times 10^{-3}$  | $12892 \pm 308$ |
| $0.2 \times 10^{-3}$  | $5550 \pm 103$  |
| 0                     | 0               |

### 3.1.2. EFECTOS DE LA DOSIS DE IRRADIACIÓN EN LA TIAMINA.

Los cromatogramas de la figura 9 muestra la disminución del área bajo la curva de la tiamina irradiada y la aparición e incremento de los productos radiolíticos que se forman después de sufrir la radiólisis esta vitamina. Principalmente se obtiene un producto radiolítico, el cual no fue identificado, sin embargo este producto es diferente a cualquiera de los dos anillos solos que forman la vitamina, ya que su espectro en la región ultra-violeta es diferente a los espectros obtenidos de la pirimidina y del tiazol y su tiempo de retención esta entre 4 y 5 minutos.

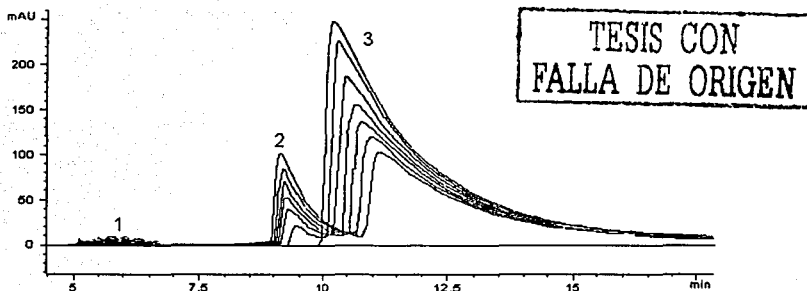


Figura 9. Cromatograma de la tiamina a diferentes dosis de irradiación (0.35, .0.7, 1.05, 1.4, 1.75, 2.1 kGy.):

1) diferentes productos radiolíticos, 2) principal producto radiolítico 3) tiamina.

En esta grafica se aprecia como a medida que se incrementa la dosis, el área del pico de la tiamina disminuye (3) y como consecuencia el área del pico del principal producto radiolítico aumenta (2).

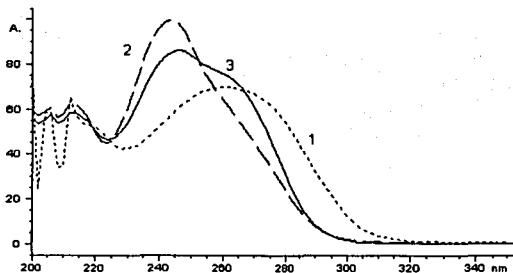


Figura 10. Espectros UV de la tiamina y sus productos radiolíticos:

- 1) ----- espectro del producto radiolítico con tiempo de retención de 5 min.
- 2) - - - - - espectro del producto radiolítico con tiempo de retención de 9.3 min.
- 3) ————— espectro de la tiamina.

En la figura 10 se puede observar como el espectro de los productos radiolíticos (1 y 2) absorben a diferente longitud de onda (nm), ya que son compuestos diferentes pues presentan otros grupos funcionales en su estructura química y son derivados de la descomposición de la tiamina, que la que presenta el espectro de la tiamina pura a una dosis de 2.1 kGy.

En la tabla 9 se presentan los resultados de la disminución en concentración y del porcentaje de descomposición de la tiamina en solución acuosa a partir de una concentración de  $1 \times 10^{-3}$  mol/L, estas muestras fueron expuestas a la radiación gamma en diferentes dosis de irradiación y a una razón de dosis de 2.1 kGy/h. Los datos fueron obtenidos del área bajo la curva de los cromatogramas individuales para cada dosis.

Debido a que el medio de reacción es acuoso y que el soluto (tiamina) en comparación con el agua se encuentra en concentraciones muy pequeñas, considero que la interacción de la radiación en el sistema será principalmente con las especies reactivas del agua. Como sabemos con anterioridad, los productos radiolíticos del agua son bastantes reactivos y son los que reaccionan principalmente con la tiamina ocasionando su descomposición.

Se cuantificó el porcentaje de pérdida de tiamina por acción de la radiación gamma por cromatografía de líquidos a alta resolución.

TABLA 9. PORCENTAJE DE PERDIDA DE TIAMINA A DIFERENTES DOSIS DE RADIACIÓN.

| Dosis (kGy) | Concentración (mol/L)  | Perdida (%) | Tiempo (min.) | Área (mUA) |
|-------------|------------------------|-------------|---------------|------------|
| 0           | $1 \times 10^{-3}$     | 0           | 0             | 32197      |
| 0.35        | $8.758 \times 10^{-4}$ | $12 \pm 1$  | 10            | 28895      |
| 0.70        | $7.456 \times 10^{-4}$ | $25 \pm 1$  | 20            | 23709      |
| 1.05        | $6.696 \times 10^{-4}$ | $33 \pm 2$  | 30            | 21454      |
| 1.40        | $5.860 \times 10^{-4}$ | $42 \pm 1$  | 40            | 18978      |
| 1.75        | $5.176 \times 10^{-4}$ | $48 \pm 2$  | 50            | 16978      |
| 2.10        | $4.681 \times 10^{-4}$ | $53 \pm 2$  | 60            | 15029      |

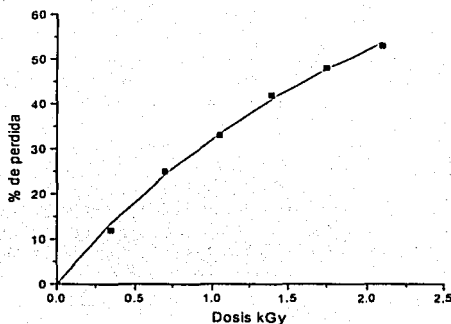


Figura 11. Gráfica del porcentaje de pérdida de la tiamina en función de la dosis.

Como se observa en la tabla 9 y la figura 11 la descomposición de la tiamina en solución acuosa, debida a la radiación, es considerable. Aun en dosis bajas, como por ejemplo las dosis utilizadas para la desinfección de granos que requiere cerca de 0.60 kGy, la pérdida presentada fue de alrededor de 25 % en solución acuosa.

Para dosis mayores similares a las empleadas para eliminar microorganismos patógenos del tipo Salmonella (3 kGy), las pérdidas fueron superiores al 50 % de pérdida por la dosis que va de 2.50 a 3 kGy.

Pero como este estudio se realizó en condiciones específicas de concentración, en ausencia de oxígeno y en solución acuosa, esto es diferente a las condiciones presentadas en los diversos alimentos que contienen tiamina, ya que se da el caso que en ocasiones esta vitamina esta ligada a enzimas u otras moléculas las cuales protegen a la vitamina de la radiación ionizante disminuyendo el grado de descomposición.

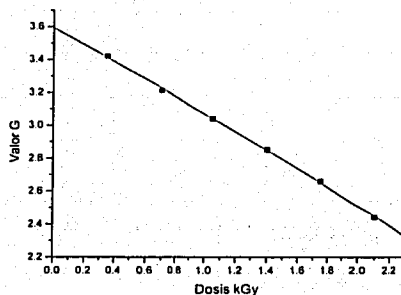


Figura 12. Gráfica del valor G de la tiamina en función de la dosis recibida y su extrapolación para obtener su valor  $G^{\circ}$

En la figura 12 se muestra la del valor G de descomposición de la tiamina a una concentración de  $1 \times 10^{-3}$  mol/L. A partir de la cual se calculó el valor  $G^{\circ}$  inicial que fue de 3.6 moléculas de tiamina descompuesta por cada 100 eV de energía absorbidas por el sistema.

### 3.2. RESULTADOS DE LA RIBOFLAVINA.

En la figura 13 se muestra el cromatograma de riboflavina obtenido por cromatografía de líquidos de alta resolución el cual fue hecho para 2 diferentes longitudes de onda, así como su tiempo de retención que fue de 8.68 min.

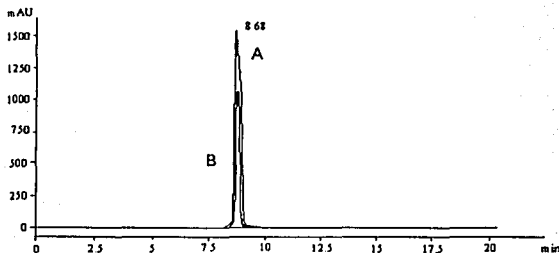


Figura 13. Cromatograma de la riboflavina: A) 268 nm, B) 224 nm.

#### 3.2.1. CURVA PATRÓN DE RIBOFLAVINA POR CROMATOGRAFÍA DE LÍQUIDOS A ALTA RESOLUCIÓN.

En la tabla 10 se muestran los datos de la concentración y sus respectivas áreas, utilizados para elaborar la curva patrón de Riboflavina representada en la Figura 14. De la cual se obtuvo la ecuación siguiente (con ayuda del programa Origin 6.1).

$$\text{Concentración} = 175497272 \times \text{área bajo la curva} \pm 1060848$$

El valor de la pendiente lo utilizamos para calcular la concentración final de las diferentes muestras que se expusieron a diferentes dosis de radiación gamma. Como anteriormente lo hemos dicho cada punto representa el promedio del área de tres o más muestras a una concentración determinada.



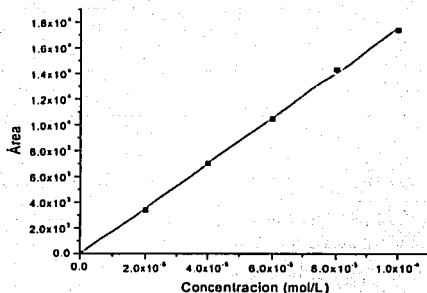


Figura 14. Curva patrón del área bajo la curva del cromatograma en función de la concentración de la riboflavina a 268 nm.

TABLA 10. DATOS DE LA CURVA PATRÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RIBOFLAVINA VS. ÁREABAJO LA CURVA DEL CROMATOGRAMA OBTENIDO A 286 NM.

| Concentración (mol/L) | Área (mUA)      |
|-----------------------|-----------------|
| $1 \times 10^{-4}$    | $17500 \pm 214$ |
| $0.8 \times 10^{-4}$  | $14315 \pm 275$ |
| $0.6 \times 10^{-4}$  | $10530 \pm 150$ |
| $0.4 \times 10^{-4}$  | $7022 \pm 120$  |
| $0.2 \times 10^{-4}$  | $3510 \pm 137$  |
| 0                     | 0               |

### 3.2.2. EFECTO DE LA DOSIS DE IRRADIACIÓN EN LA RIBOFLAVINA.

En la figura 15 se presenta el cromatograma A que representa a la riboflavina sin irradiar y el cromatograma B representa a la riboflavina sometida una dosis de radiación gamma de 2.1 kGy, en esta ultima se nota la disminución del área bajo la curva de la riboflavina, así como también la aparición de otros picos con diferentes tiempos de retención, que son los productos radiolíticos obtenidos después de la irradiación. Estos productos se presentan a dosis bajas en concentraciones despreciables.

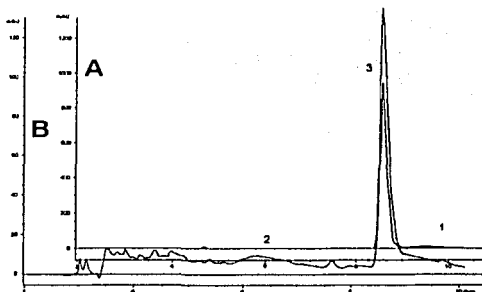
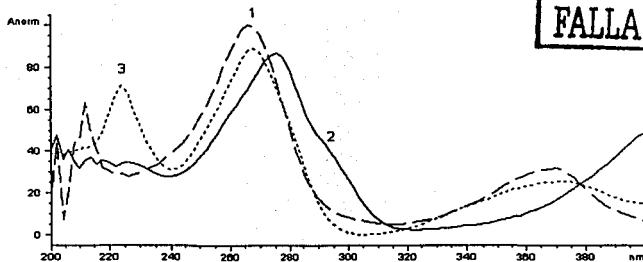


Figura 15. A) Cromatograma de la riboflavina sin irradiada,  
B) Cromatograma de la riboflavina irradiado a una dosis de 2.1 kGy.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 16. Espectro UV de los productos radiolíticos y la riboflavina,  
1) --- espectro del producto radiolítico con tiempo de retención de 9.94 min.  
2) ——— espectro del producto radiolítico con tiempo de retención de 6.38min.  
3) ..... espectro de la riboflavina con tiempo de retención de 8.68 min.

En la figura 16 se muestra como el espectro de los dos productos radiolítico absorbe a diferente longitud de onda (nm) en comparación con el espectro de la riboflavina pura a una dosis de 2.1 kGy, además se nota como el espectro de la riboflavina sigue su corrimiento hasta el intervalo de longitud de onda visible, que es lo que le da su color característico.

En la tabla 11 se muestra el porcentaje de descomposición y su desviación estándar que presenta la riboflavina en solución acuosa, expuesta a la radiación gamma en diferentes dosis a una concentración inicial de  $1 \times 10^{-4}$  mol/L.

TABLA 11. PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE RIBOFLAVINA A DIFERENTES DOSIS DE RADIACIÓN.

| Dosis (kGy) | Concentración (mol/L)  | Perdida (%)  | Tiempo (min.) | Área (mUA) |
|-------------|------------------------|--------------|---------------|------------|
| 0           | $1 \times 10^{-4}$     | 0            | 0             | 17386      |
| 0.35        | $6.9 \times 10^{-5}$   | $31 \pm 2$   | 10            | 12447      |
| 0.70        | $4.897 \times 10^{-5}$ | $51 \pm 2$   | 20            | 8572       |
| 1.05        | $3.447 \times 10^{-5}$ | $65.5 \pm 2$ | 30            | 5853       |
| 1.40        | $2.455 \times 10^{-5}$ | $75.5 \pm 1$ | 40            | 4231       |
| 1.75        | $1.529 \times 10^{-5}$ | $84.5 \pm 1$ | 50            | 2919       |
| 2.10        | $1.193 \times 10^{-5}$ | $88 \pm 1$   | 60            | 2067       |

Como se vio el porcentaje de descomposición de la riboflavina es mas elevado en comparación a la tiamina en las mismas dosis de irradiación, pero en realidad esto no es cierto, ya que esta solución tiene una concentración mas baja ( $1 \times 10^{-4}$ ) que la utilizada en la solución de la tiamina ( $1 \times 10^{-3}$ ) por lo que su descomposición es más notoria, pero en concentraciones mas elevadas esta descomposición será menor, también se hace notar que hay una pérdida importante de riboflavina debido a su alta reactividad a la luz y a la interacción con los radicales reactivos del agua producidos durante el proceso de irradiación. Cabe hacer notar que como lo hemos dicho con anterioridad los resultados aquí presentados no son equivalentes con los que se presentan después en los procesos de irradiación de diversos alimentos.

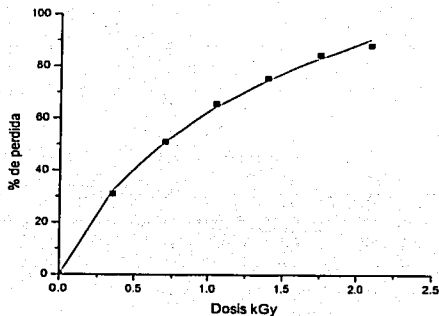


Figura 17. Gráfica de Dosis vs. Porcentaje de pérdida de Riboflavina causada por la irradiación gamma.

En la figura 18 se muestra la grafica del valor G de descomposición de riboflavina a una concentración inicial de  $1 \times 10^{-4}$  mol/L, expuesta a diferentes dosis de radiación gamma. A partir de esta se calculó el valor  $G^0$  inicial que resultó ser de 1.0. De este valor representa que únicamente se destruye una molécula de riboflavina por cada 100 eV de energía absorbida por el sistema.

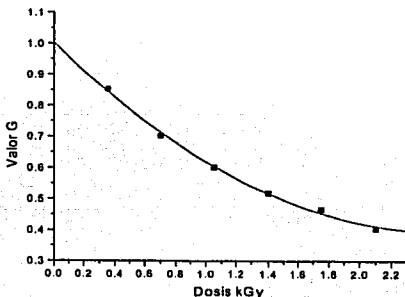


Figura 18. Gráfica del valor G en función de la dosis y su extrapolación para obtener el valor de  $G^0$ .

### 3.3. RESULTADOS DE LA PIRIDOXINA.

La figura 19 muestra el cromatograma de piridoxina obtenido por cromatografía de líquidos de alta resolución a 2 longitudes de onda y se presenta su tiempo de retención que fue de 9.3 minutos.

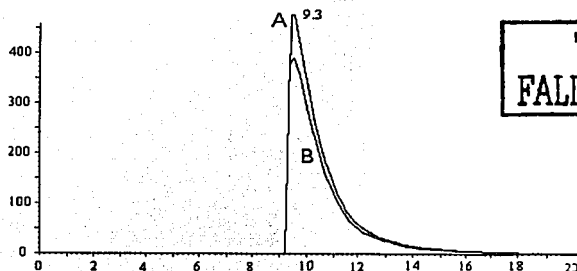
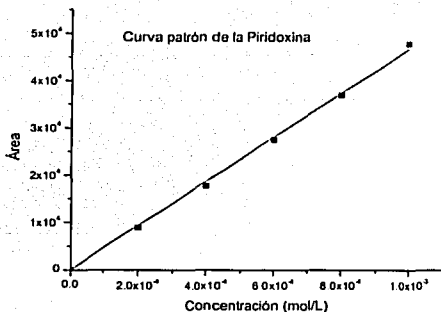


Figura 19. Cromatograma de la Piridoxina A) 292 nm, B) 285 nm.

#### 3.3.1. CURVA PATRÓN DE PIRIDOXINA POR CROMATOGRFÍA DE LÍQUIDOS DE ALTA RESOLUCIÓN.

En la figura 20 se muestran la curva patrón de piridoxina utilizada para las mediciones de concentración a diferentes dosis de irradiación, la determinación se realizó a 292 nm. Como anteriormente lo hicimos de esta obtuvimos la ecuación de la recta (con ayuda del programa Origin 6.1) y mediante esta se calculó la concentración final de las muestras expuestas a diferentes dosis de radiación gamma. Cada punto en la grafica representa el promedio de 3 ó más mediciones realizadas a una concentración determinada. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$\text{Concentración} = 46699363 \times \text{área bajo la curva} \pm 509007$$



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Figura 20. Curva patrón del área bajo la curva del cromatograma en función de la concentración de la Piridoxina.

En la tabla 12 se muestran los datos utilizados, en la elaboración de la curva patrón de piridoxina a diferentes concentraciones, los valores representan el promedio y su desviación estándar de mas de 3 inyecciones.

TABLA 12. DATOS PARA REALIZAR LA CURVA PATRÓN DE PIRIDOXINA.

| Concentración (mol/L) | Área (mUA)      |
|-----------------------|-----------------|
| $1 \times 10^{-3}$    | $47824 \pm 625$ |
| $8 \times 10^{-4}$    | $36967 \pm 492$ |
| $6 \times 10^{-4}$    | $28020 \pm 468$ |
| $4 \times 10^{-4}$    | $18680 \pm 369$ |
| $2 \times 10^{-4}$    | $9040 \pm 213$  |
| 0                     | 0               |

### 3.3.2. EFECTOS DE LA DOSIS DE IRRADIACIÓN EN LA PIRIDOXINA.

Los cromatogramas de la figura 21 muestra la disminución del área bajo la curva de la piridoxina irradiada a diferentes dosis y la aparición e incremento de las áreas de los 3 principales productos radiolíticos que se forman después de que ha sufrido un tratamiento de radiólisis esta vitamina, los cuales no fueron identificados.

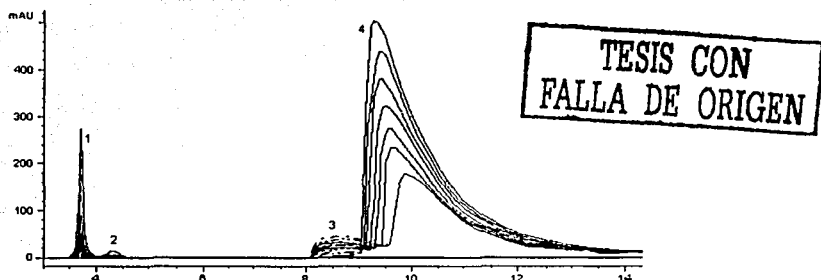


Figura 21. Cromatograma de la piridoxina irradiada a diferentes dosis que va de 0 a 2.1 kGy: 1, 2 y 3) productos radiolíticos y 4) Piridoxina.

En la figura 21 se muestra como a medida que se incrementa la dosis, disminuye en el cromatograma el área del pico de la piridoxina (4) y en los productos radiolíticos (1,2 y 3) se incrementan su área.

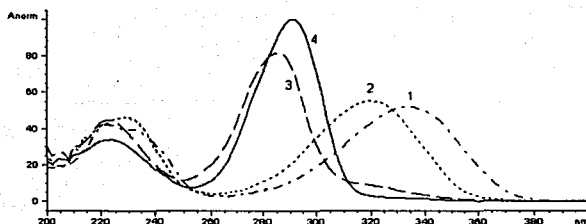


Figura 22. Espectros UV de los productos radiolíticos y la piridoxina:

- 1) - · - · - Espectro del producto radiolítico con un tiempo de retención de 3.7 min.
- 2) - - - - Espectro del producto radiolítico con un tiempo de retención de 4.3 min.
- 3) - · - - Espectro del producto radiolítico con un tiempo de retención de 8.7 min.
- 4) ——— Espectro de la piridoxina con tiempo de retención 9.3 min..

En la figura 22 se muestran los espectros y las diferentes longitudes de onda a la que absorben los productos radiolíticos de la piridoxina (1,2 y 3), así como también el de la piridoxina pura que no son los mismos, a una dosis de 2.1 kGy.

En la tabla 13 se observan los diferentes porcentajes de pérdida, con respecto a diferentes dosis de irradiación a una concentración inicial de  $1 \times 10^{-3}$  mol/L. El porcentaje es promedio de 3 o más inyecciones, además se presenta su desviación estándar.

TABLA 13. PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE PIRIDOXINA A DIFERENTES DOSIS DE IRRADIACIÓN.

| Dosis (kGy) | Concentración (mol/L)  | Pérdida (%) | Tiempo (min.) | Área. |
|-------------|------------------------|-------------|---------------|-------|
| 0           | $1 \times 10^{-3}$     | 0           | 0             | 0     |
| 0.35        | $8.729 \times 10^{-4}$ | $12 \pm 1$  | 10            | 47824 |
| 0.70        | $7.484 \times 10^{-4}$ | $25 \pm 1$  | 20            | 41175 |
| 1.05        | $6.252 \times 10^{-4}$ | $37 \pm 2$  | 30            | 34686 |
| 1.40        | $5.241 \times 10^{-4}$ | $47 \pm 1$  | 40            | 29080 |
| 1.75        | $4.814 \times 10^{-4}$ | $50 \pm 2$  | 50            | 23761 |
| 2.1         | $4.044 \times 10^{-4}$ | $59 \pm 2$  | 60            | 18935 |

A continuación se muestran los resultados del porcentaje de pérdida presentados por la acción de la radiación gamma a diferentes dosis a una concentración inicial de  $1 \times 10^{-3}$  mol/L.

Como se observa en la tabla 13 y la figura 23 la descomposición de la piridoxina en solución acuosa, es casi similar a la presentada en la descomposición de la tiamina. Aunque como se menciona con anterioridad esta vitamina se presenta casi por lo regular en forma de coenzima en algunos procesos metabólicos, por lo que su radiólisis se presenta diferente a la de la vitamina sola.

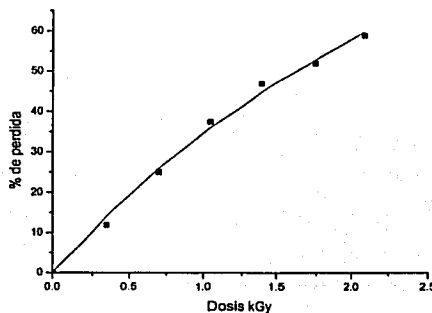


Figura 23. Gráfica del porcentaje de pérdida de piridoxina en función de la dosis recibida.



En la figura 24 se muestra la grafica del valor G de descomposición de piridoxina a una concentración inicial de  $1 \times 10^{-3}$  mol/L, a diferentes dosis de irradiación. A partir de la cual se calculo un valor  $G^{\circ}$  inicial de 3.5 moléculas de piridoxina descompuestas por cada 100 eV de energía absorbidas por el sistema.

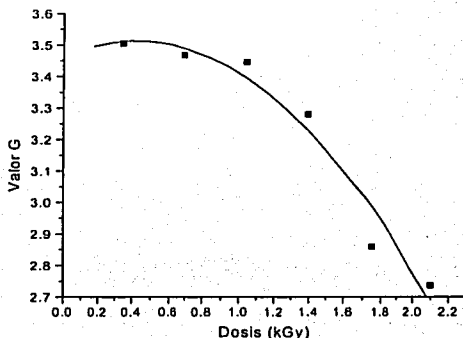


Figura 24. Gráfica del valor G de piridoxina en cada dosis utilizada y su extrapolación para obtener el valor  $G^{\circ}$ .

En general, para la perfecta identificación de los productos radiolíticos que son producidos por la acción de la radiación gamma, se necesitan otro tipo de métodos de análisis, como el espectrómetro de masas. Los cuales pueden ser tema de otra investigación futura.

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

## CONCLUSIONES.

\* En la tiamina el porcentaje de descomposición es considerable ya que a la dosis máxima usada de 2.1 kGy se obtuvo una pérdida de hasta 53 %.

Aparecieron diferentes picos cromatográficos, con tiempos de retención y espectros en el ultravioleta diferentes al de la tiamina, esto indica la presencia de productos radiolíticos (con grupos funcionales diferente) en pequeñas concentraciones.

Se logró una buena separación de los productos radiolíticos de la tiamina con una resolución de 1 ó mayor.

El valor  $G^\circ$  de descomposición de la tiamina es de 3.6 en solución acuosa con una concentración de  $1 \times 10^{-3}$  mol/L, libres de oxígeno, lo que nos indica que la descomposición es alta, este resultado concuerda con trabajos similares reportados en las referencias.

\* En la riboflavina el porcentaje de descomposición (88 %) presentado es mayor en comparación con el que se da en la tiamina y la piridoxina, esto es debido a que estas muestras fueron irradiadas a una concentración inicial más baja.

También, aquí se presentan varios productos radiolíticos provenientes de la radiólisis de la riboflavina los cuales se identifican por su diferente longitud de onda a que absorben en su espectro. Los cuales se separan de la riboflavina aunque no se tiene una buena resolución entre ellos.

El valor  $G^\circ$  de descomposición de la riboflavina es de 1.0 en solución acuosa a una concentración de  $1 \times 10^{-4}$  mol/L, libre de oxígeno, lo que quiere decir que de las tres vitaminas la riboflavina es la que pierde un menor número de moléculas por cada 100 eV de energía absorbida por el sistema.

\* En el caso de la piridoxina se observa que el porcentaje de descomposición (59 %) es similar al que presenta la tiamina, lo que no quiere decir que la radiólisis se comporte de manera similar, ya que cada vitamina tiene un mecanismo de radiólisis diferente, siendo que en este caso se presentan tres productos radiolíticos y en el caso de la tiamina solamente se tiene un producto radiolítico principal.

De manera similar a la tiamina se forma un producto principal que se separa con una resolución de 1 y otros dos compuestos producidos son muy bien separados.

El valor  $G^\circ$  de descomposición de la piridoxina es de 3.5 bajo las condiciones de antes mencionadas, en la concentración inicial de  $1 \times 10^{-3}$  mol/L.

\* La separación de los productos radiolíticos de las vitaminas por cromatografía de líquidos de alta resolución se obtuvo con valores de resolución de 1 ó mayores, lo cual permitió cuantificar adecuadamente su descomposición.

Comparando las tres vitaminas de este trabajo, se encontró que en el caso de la riboflavina el porcentaje de descomposición fue mayor que en las otra dos vitaminas, debido a la baja concentración que se utilizó de esta vitamina, ya que esta presenta una solubilidad menor que en las concentraciones utilizadas en la tiamina y piridoxina.

La explicación de por que el este estudio se realiza en solución acuosa, se debe a que estas vitaminas comúnmente se encuentran disueltas en agua en los alimentos, lo que nos lleva a suponer que los resultados aquí obtenidos son similares a los que se presentan en un proceso de irradiación de alimentos convencional.

La descomposición de estas vitaminas no es proporcional a la dosis absorbida, ya que con la aparición de los productos radiolíticos, estos también entran en competencia por los radicales libres del agua.

Los productos radiolíticos de estas tres vitaminas principalmente se forman a partir de la reducción de estas mediante la reacción de los radicales hidroxilo del agua.

Con los datos aquí obtenidos podemos hacer un calculo previo de la dosis de irradiación a que se pueden someter los alimentos que contienen estas vitaminas, para que en el proceso estos sufran la menor perdida posible en su concentración.

## INDICE DE FIGURAS.

|                                                                                                                                | PAGINA |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| FIGURA 1. FORMULA DESARROLLADA DE LA TIAMINA.                                                                                  | 3      |
| FIGURA 2. FORMULA DESARROLLADA DE LA RIBOFLAVINA.                                                                              | 4      |
| FIGURA 3. FORMULA DESARROLLADA DE LA PIRIDOXINA.                                                                               | 5      |
| FIGURA 4. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.                                                                                           | 10     |
| FIGURA 5. PODER DE PENETRACIÓN RELATIVO DE LAS RADIACIONES ALFA, BETA Y GAMMA.                                                 | 13     |
| FIGURA 6. COMPONENTES PRINCIPALES DEL IRRADIADOR GAMMABEAM-651 PT.                                                             | 30     |
| FIGURA 7. CROMATOGRAMA DE TIAMINA.                                                                                             | 33     |
| FIGURA 8. CURVA PATRÓN DE TIAMINA POR CROMATOGRAFÍA DE LÍQUIDOS A ALTA RESOLUCIÓN DETERMINADA A 246 NM.                        | 34     |
| FIGURA 9. CROMATOGRAMA DE LA TIAMINA A DIFERENTES DOSIS DE IRRADIACIÓN.                                                        | 35     |
| FIGURA 10. ESPECTROS UV DE LA TIAMINA Y SUS PRODUCTOS RADIOLÍTICOS.                                                            | 35     |
| FIGURA 11. GRAFICA DEL PORCENTAJE DE PERDIDA DE LA TIAMINA EN FUNCIÓN DE LA DOSIS.                                             | 37     |
| FIGURA 12. GRAFICA DEL VALOR G DE LA TIAMINA EN FUNCIÓN DE LA DOSIS RECIBIDA Y SU EXTRAPOLACIÓN PARA OBTENER SU VALOR G.       | 38     |
| FIGURA 13. CROMATOGRAMA DE LA RIBOFLAVINA.                                                                                     | 39     |
| FIGURA 14. CURVA PATRÓN DEL ÁREA BAJO LA CURVA DEL CROMATOGRAMA EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LA RIBOFLAVINA A 268 NM.     | 40     |
| FIGURA 15. A) CROMATOGRAMA DE LA RIBOFLAVINA SIN IRRADIAR. B) CROMATOGRAMA DE LA RIBOFLAVINA IRRADIADA A UNA DOSIS DE 2.1 KGY. | 41     |
| FIGURA 16. ESPECTRO UV DE LOS PRODUCTOS RADIOLÍTICOS Y LA RIBOFLAVINA.                                                         | 41     |
| FIGURA 17. GRAFICA DE DOSIS VS PORCENTAJE DE PERDIDA DE RIBOFLAVINA CAUSADA POR LA IRRADIACIÓN GAMMA.                          | 42     |
| FIGURA 18. GRAFICA DEL VALOR G EN FUNCIÓN DE LA DOSIS Y SU EXTRAPOLACIÓN PARA OBTENER EL VALOR G°.                             | 43     |
| FIGURA 19. CROMATOGRAMA DE LA PIRIDOXINA.                                                                                      | 44     |
| FIGURA 20. CURVA PATRÓN DEL ÁREA BAJO LA CURVA DEL CROMATOGRAMA EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LA PIRIDOXINA.               | 45     |
| FIGURA 21. CROMATOGRAMA DE LA PIRIDOXINA IRRADIADA A DIFERENTES DOSIS DE 0 A 2.1 KGY.                                          | 46     |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 22. ESPECTROS UV DE LOS PRODUCTOS RADIOLÍTICOS Y LA PIRIDOXINA.                                              | 46 |
| FIGURA 23. GRAFICA DEL PORCENTAJE DE PERDIDA DE PIRIDOXINA EN FUNCIÓN DE LA DOSIS RECIBIDA.                         | 47 |
| FIGURA 24. GRAFICA DEL VALOR G DE LA PIRIDOXINA EN CADA DOSIS UTILIZADA Y SU EXTRAPOLACIÓN PARA OBTENER EL VALOR G° | 48 |

### INDICE DE TABLAS.

|                                                                                                                                  | PAGINA |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| TABLA 1. ALIMENTOS RICOS EN TIAMINA.                                                                                             | 8      |
| TABLA 2. ALIMENTOS RICOS EN RIBOFLAVINA.                                                                                         | 8      |
| TABLA 3. ALIMENTOS RICOS EN PIRIDOXINA.                                                                                          | 9      |
| TABLA 4. ESTABILIDAD DE LAS VITAMINAS FRENTE A DIVERSOS AGENTES.                                                                 | 23     |
| TABLA 5. ESTABILIDAD A LA RADIACIÓN GAMMA DE LA RIBOFLAVINA EN SOLUCIÓN ACUOSA.                                                  | 24     |
| TABLA 6. ESTABILIDAD A LA RADIACIÓN DE LA RIBOFLAVINA EN VARIOS ALIMENTOS.                                                       | 25     |
| TABLA 7. ESTABILIDAD A LA RADIACIÓN DE LA PIRIDOXINA EN DIVERSOS ALIMENTOS.                                                      | 26     |
| TABLA 8. DATOS DE LA CURVA PATRÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE TIAMINA Y SUS ÁREAS BAJO LA CURVA DEL CROMATOGRAMA OBTENIDA A 246 NM.   | 34     |
| TABLA 9. PORCENTAJE DE PERDIDA DE TIAMINA A DIFERENTES DOSIS DE RADIACIÓN.                                                       | 35     |
| TABLA 10. DATOS DE LA CURVA PATRÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RIBOFLAVINA VS ÁREA BAJO LA CURVA DEL CROMATOGRAMA, OBTENIDO A 268 NM. | 41     |
| TABLA 11. PORCENTAJE DE PERDIDA DE RIBOFLAVINA A DIFERENTES DOSIS DE RADIACIÓN.                                                  | 43     |
| TABLA 12. DATOS PARA REALIZAR LA CURVA PATRÓN DE PIRIDOXINA.                                                                     | 46     |
| TABLA 13. PORCENTAJE DE PERDIDA DE PIRIDOXINA A DIFERENTES DOSIS DE IRRADIACIÓN.                                                 | 48     |

## REFERENCIAS.

1. Calderón-Miranda, M.. Y San Martín-González, M.F. 1998. Métodos no térmicos para el procesamiento de alimentos. Cuadernos de nutrición 21, 6, pp. 30-35.
2. The Merck Index: An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals. 1989. 11ª Edition. Rahway, New Jersey: Merck. P. 9029.
3. Deleenherr, Lambert, De Ruyter, 1985. Moder Chromatographic Analysis of the Vitamins. Ed. Marcel Dekker, Inc. pp. 413-417.
4. Khalid, A. M. Fahad, J. A. and Neelofur, A. A. 1989. Analytical Profile of Thiamine Hydrochloride in: Analytical Profiles of Drug Substances. Florey, K. ed. San Diego, California: Academic Press. Pp. 431-435.
5. *Las vitaminas* [en línea] Piridoxina información técnica RDA. Academia de Ciencias. <[www.nutryweb.com/vitamins](http://www.nutryweb.com/vitamins)>[consultado el 12 septiembre 2001]
6. *Tus vitaminas*[en línea] Riboflavina y Piridoxina, por Mónica Draghici y Jonathan Perkes < [www.cuerpodiet.com/tusvitaminas](http://www.cuerpodiet.com/tusvitaminas)>[consultado el 14 septiembre 2001]
7. Lamden, M. P. 1972. Thiamine in: The Vitamins. Chemistry, Physiology, Pathology, Methods. Sebrell, W.H. and Harris, R.S, eds. Nueva York: Academic Press. Pp. 114-118.
8. Muñoz, M., Hernández, M. y Roldan, J.A. 1991. Tablas del valor nutritivo de los alimentos de mayor consumo en México. México: Instituto Nacional de Nutrición.
9. *Vitaminas hidrosolubles*[en línea] Tiamina, Riboflavina y Piridoxina <[www.delpaciente.com](http://www.delpaciente.com)> [consultado el 9 septiembre 2001]
10. Spinks, J.W. and Woods, R. J. 1990. An Introduction to Radiation Chemistry. New York: John Wiley and Sons. Pp. 1-3, 17, 18, 477-480.
11. Draganic, I.G. and Draganic, Z. 1990. Radiation and Radioactivity on Earth and Beyond. Boca Raton, Florida: CRC. Pp. 74-79, 83-86.
12. Laughlin, W L., Boyd, A. W., Chadwick, K. H., Donald, J. C., and Miller, A. 1989. Dosimetry for Radiation Processing. London: Taylor and Francis. Pp 53,54,143-145.
13. Draganic, Y. G. and Draganic, Z. 1971. The Radiation Chemistry of Water. Nueva York: Academic Press. Pp. 203-206.

14. Cruz Zaragoza E. 1997. Irradiador Gammabeam 651 PT, Instituto de Ciencias Nucleares UNAM. Requerimientos de protección radiológica en irradiadores industriales tipo alberca.
15. Azamar, J.A. 1982. Dosimetría de las fuentes de irradiación gamma de  $^{60}\text{Co}$  del Centro de Estudios Nucleares, UNAM: Gammabeam-650 y Gammacell-200. Informe técnico. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
16. Jenkins, R. K., Thayer, D. W., and Hansen T. J. 1989. Effect of low-dose irradiation and post-irradiation cooking and storage on the thiamin content of fresh pork. *J. Food Sci.* 54, 6: 1461-1465.
17. Kilcast, D. 1994. Effect of irradiation on vitamins. *Food Chem.* 49: 157-164.
18. Tabata, Y. 1991. Handbook of Radiation Chemistry. Boca Raton: CRC Press. Pp. 820-830.
19. Urbain, W.M. 1986. Food Irradiation. New York: Academic Press. Pp. 117-130.
20. Tobback, P.P. 1977. Radiation Chemistry of Vitamins in: Radiation Chemistry of Major Components. Elias, P.S. and Cohen, A.J. eds. Amsterdam: Elsevier. Pp. 187-220.
21. Kishore, K., Moorthy, P.N., and Rao, K. N. 1980. Radiation induced reactions in aqueous solutions of thiamine (vitamin B<sub>1</sub>). *Radiat. Phys. Chem.* 15: 669-676.
22. Forrester, A. R. and Davidson I. G. 1990. Identification of radicals produced by gamma-irradiation of vitamins. *Radiat. Phys. Chem.* 36, 3: 403-407.