



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Complejo Regional Nororiental
Centro Universitario de la Salud

**“EFECTOS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE EN LA
EMBRIOGÉNESIS”**

TESINA

Para obtener el título de:

PROFESIONAL ASOCIADO EN IMAGENOLOGÍA

Presenta:

José Alberto Ramos López

Directora experta:

Dra. Esther Neri Rubio

Director metodológico

Dr. Fabio Morandín Ahuerma

Teziutlán, Puebla.

Enero 2023



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Complejo Regional Nororiental

Centro Universitario de la Salud

**“EFECTOS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE EN LA
EMBRIOGÉNESIS”**

TESINA

Para obtener el título de:

PROFESIONAL ASOCIADO EN IMAGENOLOGÍA

Presenta:

José Alberto Ramos López

Teziutlán, Puebla.

Enero 2023



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Complejo Regional Nororiental

Centro Universitario de la Salud

**“EFECTOS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE EN LA
EMBRIOGÉNESIS”**

TESINA

Para obtener el título de:

PROFESIONAL ASOCIADO EN IMAGENOLOGÍA

Presenta:

José Alberto Ramos López

Directora experta:

Dra. Esther Neri Rubio.

Director metodológico:

Dr. Fabio Morandín Ahuerma

Revisores:

T.R. Ulises Giovanni Romero García

T.R. Andrés Hernández Apango

Teziutlán, Puebla.

Enero 2023



BUAP

OFICIO: CRZN/2409/2021

**C. JOSE ALBERTO RAMOS LOPEZ
P R E S E N T E .**

En atención a la solicitud con fecha 27 de octubre de 2021 presentada a la Responsable de Titulación y Seguimiento de Egresados para la revisión y autorización del anteproyecto titulado: **“EFECTOS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE EN LA EMBRIOGÉNESIS”** para sustentar examen profesional comunico a usted lo siguiente:

1.- Se acepta en lo general el anteproyecto con la salvedad de que se cumpla con las observaciones que tanto el Comité Académico del Programa Educativo notificó en el dictamen de aprobación como de las que los Directores de Tesina consideren convenientes, para lo cual se han designado:

ASESOR DE TESINA EXPERTO: M. R. Esther Neri Rubio.

ASESOR DE TESINA METODOLÓGICO: Dr. Fabio Moradín Ahuerma.

2.- A partir de la fecha de emisión del presente documento, el tiempo máximo para concluir el trabajo y presentar el examen profesional es de seis meses.

3.- Una vez concluida la Tesina y que sea liberada de su(s) director(es), se turnará a dos revisores quien en un plazo no mayor a diez días hábiles rendirán su dictamen. En caso de ser liberada, se le informará la fecha, día, lugar y hora de su celebración de examen oral.

4.-Se asignan como revisores de la Tesina a los siguientes catedráticos:

Revisor de Tesina: T. R. Andrés Hernández Apango.

Revisor de Tesina: T. R. Ulises Giovanni Romero García.

Se hace de su conocimiento para los efectos correspondientes.

Atentamente

“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”

Teziutlán, Pue., 23 de noviembre de 2021.


Dr. Sergio Díaz Carranza

Director del Complejo Regional Nororiental

c.c.p.- Archivo y minutarío
DR. SDC/mlol



“HUP, 50 AÑOS DE ENSEÑANZA Y SALUD”

OFICIO CRZN/4011/2022

C. RAMOS LOPEZ JOSE ALBERTO
EGRESADO DE PROFESIONAL ASOCIADO EN IMAGENOLOGIA
COMPLEJO REGIONAL NORORIENTAL
BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA

Con base en el dictamen emitido por la Dra. Esther Neri Rubio (Asesora Experta), Dr. Fabio Morandin Ahuerma (Asesor Metodológico) y los revisores T.R. Ulises Giovanni Romero García y T.R. Andrés Hernández Apango, en calidad de Consejo Particular se autoriza la impresión del trabajo de tesina titulado:

“EFECTOS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE EN LA EMBRIOGÉNESIS”

Correspondiente al Programa Educativo de Técnico Profesional Asociado en Imagenología.

Sin más por el momento, quedo de Usted como su seguro servidor.

Atentamente

“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”

Teziutlán, Pue., 07 de diciembre de 2022

Dr. Sergio Díaz Carranza
Director del Complejo Regional Nororiental



c.c.p.- Archivo y Minutario

MTRA.RMP/et



“HUP, 50 AÑOS DE ENSEÑANZA Y SALUD”

OFICIO CRZN/4012/2022

MTRO. RICARDO VALDERRAMA VALDEZ
DIRECTOR DE ADMINISTRACION ESCOLAR
BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA
PRESENTE

Por este conducto me permito comunicar a Usted que el C. RAMOS LOPEZ JOSE ALBERTO, con matrícula 201701839 pasante del Programa Educativo de Técnico Profesional Asociado en Imagenología, ha cumplido con los requisitos establecidos en este Complejo Regional Nororiental en relación a la elaboración de su trabajo recepcional titulado “EFECTOS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE EN LA EMBRIOGÉNESIS”, por lo que la modalidad de Titulación será por defensa de Tesina.

Así mismo, comunico a Usted el examen profesional que sustentará el mencionado pasante será el día 25 de enero de 2023, a las 12:00 horas, en la modalidad presencial y el Jurado calificador estará constituido de la siguiente manera:

PRESIDENTE T.R. Ulises Giovanni Romero García

SECRETARIO T.R. Andrés Hernández Apango

VOCAL Dr. Fabio Morandin Ahuerma

Sin más por el momento, quedo de Usted como su seguro servidor.

Atentamente

“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”

Teziutlán, Pue., 07 de diciembre de 2022


Dr. Sergio Díaz Carranza
Director del Complejo Regional Nororiental

c.c.p.- Archivo y Minutorio
MTRA.RMP/eft



Complejo Regional
Nororiental

Arias y Boulevard sin número
Col. El Carmen, Teziutlán, Puebla.
222 2 29 55 00 Ext. 5538, 3700, 3701, 3702

Agradecimientos

En primer lugar, les agradezco a mis padres y a dios que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades.

Quiero agradecer muy profundamente a mis tutores la Dra. Esther Neri Rubio y al Dr. Fabio Morandín Ahuerma, por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiese podido lograr llegar a estas instancias tan deseada. Gracias por su guía y todos sus consejos.

Así como a mis revisores T.R. Ulises Giovanni Romero García y al T.R. Andrés Hernández Apango por su tiempo y dedicatoria como también de sus recomendaciones para poder llegar a la meta tan deseada.

Índice

Índice.....	1
Resumen	3
Introducción.....	4
Objetivos	6
Objetivo general:.....	6
Objetivos específicos:	6
Embriogénesis.....	7
Gametogénesis	7
Ovogénesis	8
Espermatogénesis	8
Fecundación.....	10
Segmentación	11
Gastrulación	12
Organogénesis.....	12
Periodo Fetal	14
Radiación Ionizante.....	15
Tipos de Radiación	16
Generación y Propiedades de los Rayos X.....	18
Interacción de los Rayos X con la Materia	19
Formación de la Imagen.....	20
Protección y Seguridad Radiológica.....	21
Factores Básicos de Protección Radiológica	23

Cantidades, Unidades y Definiciones.....	24
La NOM-229-SSA1-2002	24
Dosimetría Personal.....	26
Normas Generales de Protección Radiológica Respecto a los Pacientes.....	26
Normas de Trabajo en Salas de Rayos X.	27
Interacción de la Radiación con la Célula y sus Componentes: Respuesta a Nivel Molecular y Celular.....	28
Efectos Biológicos de las Radiaciones Ionizantes.....	29
<i>Efectos de las Radiaciones en los Sistemas Biológicos</i>	30
Radiación y Embarazo	31
Conclusiones.....	36
Referencias	39

Resumen

En esta tesina se hablará de los efectos de la radiación ionizante en la embriogénesis, así como de los procesos biológicos que le sucede al óvulo femenino al ser fecundado por un espermatozoide, también se hablará de las normas de protección radiológica que determina la norma oficial mexicana regulada por la Comisión Internacional de Protección Radiológica.

La gestación en el ser humano comienza con la fusión de un óvulo y un espermatozoide proceso que ocurre en la ampolla de las trompas de Falopio, en la fecundación las células sexuales masculinas y femeninas experimentan un gran número de cambios que se le llama gametogénesis.

La radiación ionizante en la embriogénesis puede producir efectos teratógenos en el embrión, dentro de éstos se puede mencionar que en el primer trimestre; muerte neonatal y retraso mental entre otros, pero la presentación o no dependerá de la etapa gestacional y de la dosis de exposición.

Introducción

El período de embriogénesis del ser humano ocurre desde la fertilización del espermatozoide al óvulo proceso denominado fecundación, esto dará origen a una célula única llamada cigoto formado por 46 cromosomas; la que posteriormente descenderá hacia el útero para la gestación del embrión hasta su nacimiento.

Después tenemos la etapa embrionaria, esta comienza a partir de la tercera semana de gestación y culmina en la semana número ocho.

A partir de la semana ocho de gestación el producto recibe el nombre de feto, en esta etapa ya posee todos los sistemas y órganos, para luego ir madurando y creciendo progresivamente hasta el momento del nacimiento.

Desde su descubrimiento, los rayos X han sido ampliamente utilizados para diagnóstico y tratamiento médico; dentro de estos métodos se encuentran la radiología convencional, fluoroscopia, medicina nuclear y tomografía computarizada, en el área terapéutica se utiliza para el tratamiento de cáncer o algunas enfermedades endocrinas.

Desafortunadamente, así como tienen beneficios también presentan efectos secundarios por lo que se hizo necesario establecer normas y limitaciones de uso, en México están reglamentadas en la norma oficial mexicana NOM-229-SSA1-2002.

Las radiaciones ionizantes interactúan con la materia mediante procesos físicos, esto lleva a efectos moleculares, celulares y tisulares, que pueden ser de tipo determinístico o estocástico.

Cuando la radiación ionizante interacciona con la célula se producen ionizaciones y excitaciones ya sea en macromoléculas biológicas (DNA) o en donde están suspendidos los organelos celulares (H₂O) y según donde se produzcan estas interacciones se pueden clasificar como directa o indirecta (Arsa, 2009).

Durante todas las etapas el producto está expuesto a diversos riesgos; en la etapa embrionaria, el principal riesgo podría ser la infección por teratógenos, factores externos que afectan el desarrollo del embrión. Los efectos de la radiación ionizante en la embriogénesis dependen del periodo gestacional que sea expuesto y la dosis recibida, se ha demostrado que el primer trimestre de embarazo es el periodo más sensible, dado que el embrión es un sistema celular de rápido desarrollo con mayor sensibilidad a la radiación.

Cuando las células del embrión son mínimas el efecto más probable en la célula es un error de implantación, los efectos de la radiación están relacionados con el tiempo y dosis que incluye muerte prenatal, neonatal, anomalías congénitas, inducción de neoplasias malignas, afectación del crecimiento general, efectos genéticos y retraso mental.

Objetivos

Objetivo general:

Realizar una revisión bibliográfica de los efectos teratogénicos causados por el uso médico de la radiación ionizante.

Objetivos específicos:

- Describir el proceso de embriogénesis en el ser humano.
- Describir que es la radiación ionizante y sus usos médicos.
- Mostrar los efectos de la radiación ionizante sobre la embriogénesis.
- Establecer las medidas de protección radiológica necesarias durante la exposición para evitar efectos secundarios.

Embriogénesis

La embriología es el área que se encarga del estudio del desarrollo del embrión, es decir, desde la fecundación del óvulo hasta el nacimiento.

La embriogénesis en el ser humano comienza con la fusión de un óvulo y un espermatozoide, a este proceso se le llama fecundación de los gametos para originar una célula única llamada cigoto, posterior a múltiples divisiones celulares formará un ser humano completo constituido por millones de células, semejante a los progenitores, las etapas del desarrollo embrionario incluyen la multiplicación de células o segmentación la organización de tejidos y órganos, gastrulación organogénesis fase de modelado corporal y aumento de tamaño, llamado crecimiento.

La etapa embrionaria comienza en la tercera semana de gestación y culmina en la semana número ocho. Empezando entonces la etapa fetal que concluye con el parto, en esta etapa el producto ya posee todos sus sistemas y órganos para posteriormente ir madurando.

Gametogénesis

Se le llama así al proceso evolutivo de células germinales en gametos (células reproductoras) experimentando cambios morfológicos y cromosómicos en preparación para la fecundación, consta de tres etapas, proliferación o multiplicación, crecimiento y maduración las células sexuales se unen para originar el desarrollo de un individuo que se llama gameto (espermatozoide y óvulo) a la unión de ambos se le denomina fertilización (Bruce, 2014).

Las células germinales aumentan mediante mitosis, pero su diferenciación para fertilizar entra en un proceso llamado gametogénesis que incluye meiosis para reducir los cromosomas de 46 a 23 y completar la maduración.

La gametogénesis dependiendo del sexo puede ser masculina llamada espermatogénesis o femenina llamada ovogénesis, en ambos casos suceden las siguientes etapas:

- **Multiplicación:** consiste en que las células germinales se dividen varias veces e incrementa de número mediante mitosis.
- **Crecimiento:** las células sexuales aumentan de tamaño y sigue ocurriendo la mitosis.
- **Maduración:** Las células sexuales se dividen por última vez en dos mediante meiosis y reducen a la mitad el número de cromosomas.

En la gametogénesis masculina se agrega una etapa más que es la espermiogénesis etapa en la que se preparan para la fecundación.

Ovogénesis

Es el proceso ocurrido en el ovario por el que las células germinativas proliferan y se transforman en ovocitos, durante la etapa de multiplicación la ovogonia se divide hasta el tercer mes, agrupándose por una capa de células epiteliales planas que cubren al ovario llamadas células foliculares.

En la fase de crecimiento la ovogonia aumenta de forma y tamaño para formar el material nutritivo (vitelo) y se divide mediante mitosis. Durante la fase de maduración cuando se forma inmediatamente replica su ADN y entra en profase de la primera división meiótica.

Espermatogénesis

En este proceso las células germinales masculinas proliferan y se convierten en células libres y móviles (espermatozoides). Tienen lugar en la pared de los túbulos seminíferos de los testículos, donde se encuentran dos células sexuales que son: células grandes y pálidas, células de Sertoli. La hormona foliculoestimulante se une con la célula de Sertoli para crear o estimular el líquido testicular.

En el periodo de multiplicación las células germinales proliferan poco antes de la pubertad formando los tubos seminíferos, que son los encargados de suministrar de forma permanente espermatogonias en toda la vida sexual del hombre.

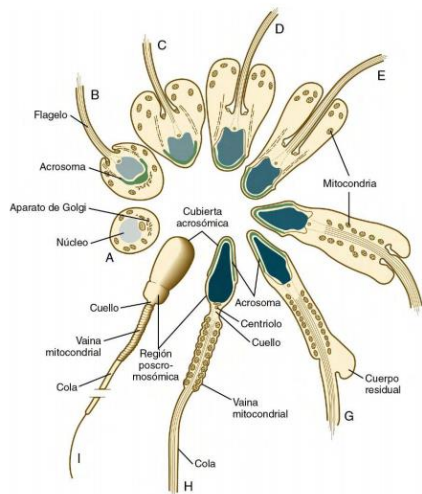
En la etapa de crecimiento existen dos tipos de células uno del tipo A y B la primera se divide mediante mitosis formando dos células madre, estas dos células conforman una reserva de por vida de dicha célula para la creación o producción del tipo B, estas pertenecen a espermatocitos primarios ambos contienen los mismos cromosomas.

En la fase de maduración los espermatocitos primarios entran en profase en tres semanas y después entran en meiosis para formar un espermatocito secundario, que tiene poco tiempo de vida y posteriormente entra en meiosis II por lo que de cada espermatocito primario se obtiene cuatro espermátidas.

El período de espermiogénesis es una etapa adicional que cambia morfológicamente las espermátidas que se encuentran envueltas por las membranas citoplasmáticas de las células de Sertoli, cerca de la luz del tubo seminífero en esta parte las espermátidas se convierten en espermatozoides; después de dicho proceso se dirigen hacia el epidídimo donde alcanza la movilidad que se observa al momento de la eyaculación.

En el ser humano el tiempo que se requiere para una espermatogonia se convierte en un espermatozoide maduro es aproximadamente de 64 días (Arteaga, 2013). **Figura 1**

Etapas de unas espermátidas a un espermatozoide maduro



Nota : Embriología Humana y Biología del Desarrollo, Carlson, (2014).

Las etapas que caracterizan al desarrollo embrionario son: fecundación, segmentación, gastrulación y diferenciación durante la semana 1 – 3 se le llama período preembrionario, de la semana 4 – 8 período embrionario llevándose a cabo la organogénesis y morfogénesis y de la semana 9 – 38 período fetal en el que ocurren la histogénesis y crecimiento (Bruce, 2014).

Fecundación

Es la unión del espermatozoide con un ovocito secundario, en un proceso complejo con cambios bioquímicos moleculares y fisiológicos, se lleva a cabo en las trompas de Falopio, en los cinco días siguientes el embrión realiza su trayecto por ella experimentando varias divisiones celulares posteriormente ingresa al útero, implantándose en la cavidad endometrial donde se desarrollará y crecerá durante aproximadamente 40 semanas.

De acuerdo con (Castillo, 2011) los ovarios y trompas de Falopio están destinados a la producción y transporte de los óvulos, las trompas de Falopio es un conducto que se encarga de la llegada del óvulo hasta el interior de la cavidad uterina tienen una longitud de 6 a 9 centímetros desde los extremos superiores del útero hasta los ovarios, la fecundación ocurre en la porción ampular, el útero es un órgano hueco en forma de pera invertida constituido por gruesas paredes musculares que son: perimetrio, miometrio y endometrio en este se lleva a cabo la preparación para recibir al óvulo fecundado, permitiendo su implantación, la función principal del útero es recibir y alojar al embrión durante el embarazo y expulsar el feto al término de la gestación.

La fecundación más que un proceso simple son varios, la fase 1 inicia cuando el espermatozoide comienza a penetrar la corona radiada, la corona está compuesta por una capa densa de células matriz con proteínas y una concentración de hidratos de carbono y ácidos hialurónico, la cabeza del espermatozoide es el elemento esencial en esta penetración; la fase 2 que es la penetración de la zona pelúcida, esta es una capa de glicoproteínas que rodea al ovocito facilitando la adhesión de la cabeza del espermatozoide e induce la reacción acrosómica y la fase 3 que es la fusión de las membranas celulares del ovocito y del espermatozoide.

Los resultados de la fecundación son tres: restablecimiento del número diploide de cromosomas, mitad de la madre y mitad del padre; determinación del sexo dependiente del cromosoma producido por el espermatozoide, ya sea X (XX femenino) o Y (XY masculino) y el inicio de la segmentación (Persaud, 2004).

Segmentación

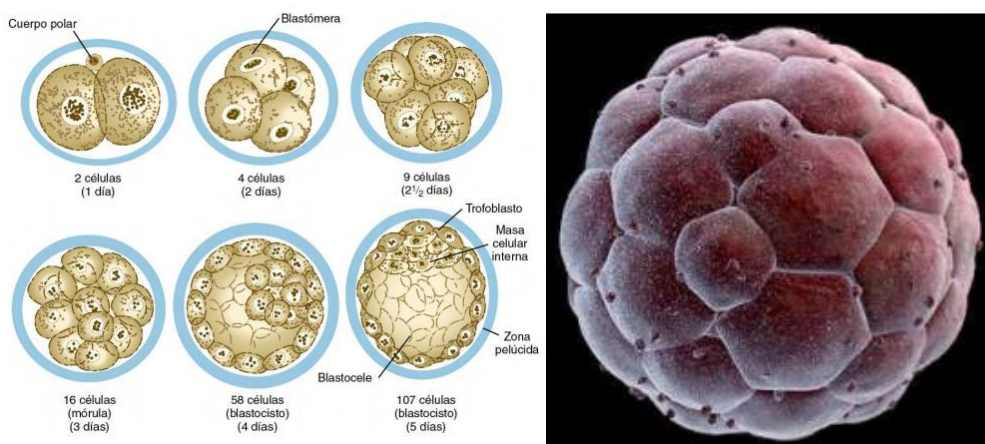
Se trata de una serie de divisiones mitóticas que ocurren después de la fecundación, se inicia cuando el cigoto lleva un trayecto por el oviducto hacia el útero y dura aproximadamente tres días.

Se caracteriza por la división mitótica del ovulo fecundado lo que origina 2 células, luego 4 células, 8 células y así sucesivamente unas más grandes que otras al tercer día forma una esfera sólida de 12 – 16 células llamada “Blastómero “que más tarde formara la “Mórula”.

Cuando la mórula entra en la cavidad uterina se introduce líquido en los espacios intercelulares, formando una cavidad llamada blastocele, en ese momento al embrión se le llama blastocisto ocurriendo la etapa de implantación al terminar la primera semana.

Figura 2

Segmentación celular por día hasta formar la Mórula



Nota: Embriología Humana y Biología del Desarrollo, Carlson, (2014).

Gastrulación

Es una serie de movimientos que organiza al embrión bilaminar en un embrión trilaminar, un embrión esférico y bidimensional en un embrión tridimensional.

El blastocisto se caracteriza por presentar un envoltorio de células o trofoblasto, una cavidad interna o blastocele y una acumulación celular en uno de los polos denominada masa celular interna. Las células más profundas de esta última constituyen el disco embrionario, a partir del cual se formará el cuerpo del embrión.

Gástrula es la formación de las capas germinales (epiblasto e hipoblasto), a partir de las cuales se van a diferenciar las tres hojas fundamentales de los diferentes tejidos del embrión: ectodermo, mesodermo y endodermo.

El trofoblasto es una membrana que tiene una serie de vellosidades, que penetran en los tejidos del endometrio iniciando la implantación del embrión además de fijarlo a la pared del útero, también lo nutre, y participa en la formación de la placenta y del cordón umbilical.

Organogénesis

Son los cambios que permiten que las capas embrionarias se transformen en los diferentes órganos que conforman un organismo, antes de este cambio el embrión sólo posee dos capas que son el hipoblasto y el epiblasto.

Las tres capas embrionarias son:

Ectodermo: Es la primera hoja blastodérmica del embrión se forma durante la fase de blástula, de él se generan la piel, glándulas epiteliales, pelo, uñas, esmalte dental, mucosas de boca, faringe, tracto recto, oído interno, sistema nervioso y cráneo.

Endodermo: Es la capa del tejido más interna aparece en la tercera semana de gestación, en esta capa formará gran parte de órganos internos más importantes

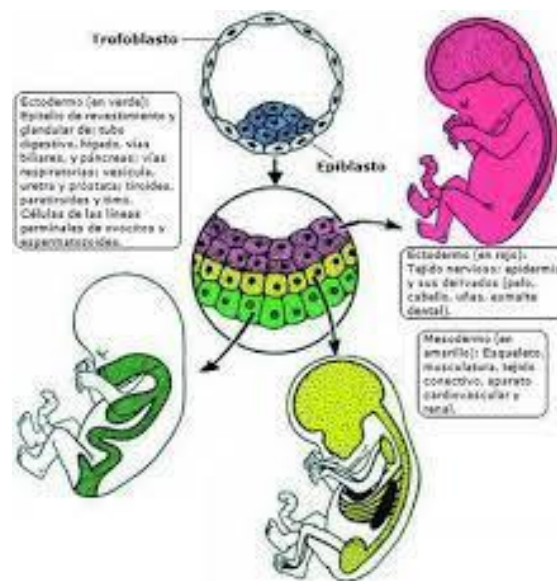
como el tubo digestivo y sus glándulas anexas, faringe, tiroides, hígado, páncreas, tráquea, pulmones y epitelio respiratorio.

Mesodermo: es una lámina blastodérmica que esta entre el ectodermo y endodermo de esta capa se derivan los músculos esqueléticos, tejido conjuntivo para todo el cuerpo a excepción de la cabeza, y cartílago, revestimiento de la cavidad torácica y abdominal, sistema urogenital, sistema circulatorio, sangre, médula ósea.

El período embrionario o de organogénesis se extiende desde la tercera a octava semana, al finalizar dicha semana de la cual se han desarrollado los órganos principales y hay formas reconocibles de los caracteres externos.

Figura 3

Las Tres Principales Capas Embrionarias



Nota: (Diferenciación Celular y Organogénesis, 2019)

Periodo Fetal

Es el tiempo que transcurre desde el comienzo del tercer mes hasta el nacimiento, se caracteriza por la maduración de los órganos y un crecimiento rápido del cuerpo, en este período son pocas las malformaciones inducidas.

Al principio del tercer mes la cabeza representa la mitad de la longitud cráneo-caudal, al comienzo del quinto mes el tamaño de la cabeza es de un tercio de la longitud cráneo-talón y al nacimiento es de un cuarto de esta longitud.

Durante el segundo trimestre del desarrollo el feto crece rápidamente en longitud, está cubierto por un cabello fino llamado lanugo y a partir del quinto mes la madre puede percibir los movimientos.

En el tercer trimestre existe un aumento considerable de peso, existe adecuada diferenciación y maduración de los órganos, al final de la vida intrauterina el feto está rodeado por una capa sebácea y adquiere contornos redondeados, la cabeza es la circunferencia más prominente del cuerpo enfocándose para su paso al canal del parto.

Radiación Ionizante

La radiación es una emisión y transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas radiactivas, que se propaga en el espacio de la misma forma que la luz, ondas de radio y televisión, es decir, a 300,000km/s por su energía puede ionizar la materia y por ello recibe el nombre de radiación ionizante formando rayos x y rayos gamma. Los rayos x se emplean con fines diagnósticos y se producen en máquinas, solo están presentes en una fracción de tiempo y tiene una energía de 10 keV que puede ionizar a los electrones del átomo.

El termino de ionización consiste en que por algún mecanismo se logra sacar un electrón de las órbitas del átomo, obteniendo dos partículas, una con carga positiva y otra con carga negativa a las que se les denomina iones.

Existe dos tipos de radiación:

- No ionizante: consiste en radiación de baja energía que no es capaz de ionizar a los átomos, como por ejemplo las ondas de radio, TV, microondas entre otras.
- Ionizante: este tipo de radiación tiene suficiente energía para ionizar a los átomos, que van desde los rayos X a la radiación cósmica.

Nos encontramos expuestos a la radiación natural en gran cantidad de circunstancias, como los materiales radiactivos presentes en agua, suelo y aire, así como a los rayos cósmicos; según la OMS el 80 – 87 % de la radiación de fondo que recibimos anualmente corresponde a radiación natural, a nivel del mar se estima que recibimos 0.03 mSv/h, en un vuelo supersónico se estima de 10 mSv/h. Se calcula la dosis que recibimos de radiación natural es de 1 a 3 mSv/año, pudiendo ser de 3 a 13 mSv/año en lugares con alta radiación natural.

Podemos recibir también radiación de fuentes artificiales como energía nuclear o la mayoría de las veces por el uso de dispositivos médicos, como los aparatos de Rayos X, la radiación artificial creada por el hombre y que está presente en una fracción de tiempo corresponde aproximadamente a un 13 - 20% y se estima que recibimos 550 mSv/año, la radiación que recibimos en radiodiagnóstico es de

1.5 a 2 mSv/año, en radioterapia 2 a 3 mSv/año, y en medicina nuclear es de 2.5 a 8 mSv/año.

Según la página de la Organización Mundial de la Salud cada año se realizan en el mundo más de 3600 millones de pruebas diagnóstica radiológicas, 37 millones de pruebas de medicina nuclear y 7.5 millones de tratamiento con radioterapia. El uso de la radiación en la medicina representa un 98% de la dosis poblacional con origen de fuentes artificiales (rayos x) y el 20% de la exposición total de la población, clasifica la radiación en tres categorías; la exposición planeada como los estudios de Rayos X o el tratamiento con radioterapia, la exposición existente donde incluye la radiación natural como los rayos ultravioletas y la exposición en situaciones de emergencia, que ocurre con un evento no planeado como los accidentes nucleares (Organización Mundial de la Salud, 2016).

Tipos de Radiación

Existen varios tipos de radiación ionizante; las alfa, beta y gamma.

Las radiaciones alfa están formadas por dos neutrones y dos protones son poco penetrantes, una hoja de papel o la piel sirven de protección contra ella.

Las radiaciones beta son flujos de electrones o positrones liberados en ciertas desintegraciones nucleares, tienen menos masa que las alfa y son un poco más penetrantes, pueden traspasar unos dos centímetros de tejido vivo, pero no traspasan una capa de aluminio (como el de una lata).

Los rayos X y gamma son radiaciones electromagnéticas sin carga ni masa se desplazan a la velocidad de la luz, los rayos X proceden de las capas externas del átomo y los rayos gamma de la desintegración de los núcleos inestable, son altamente penetrantes, para protegernos de ellas se requieren láminas de plomo gruesas.

La radiación alfa y beta o radiación por partículas son por desintegración radiactiva, comúnmente son utilizadas en los tratamientos de braquiterapia, porque tienen un tiempo de vida útil.

La radiación alfa de una fuente externa es prácticamente inofensiva, pero de una fuente interna sucede lo contrario, si se deposita un radioisótopo emisor de partículas alfa en el cuerpo puede irradiar intensamente el tejido local.

Las partículas beta son partículas ligeras con número atómico 0 y pueden ser con carga positiva o negativa, se originan en el núcleo de átomos radioactivos.

Los rayos X son operados en una máquina y son emitidos por una fracción de tiempo, debido a su penetración y bajo nivel de ionización son especialmente útiles para el diagnóstico médico; por el contrario, los rayos gamma están radiando constantemente porque son inestables y esto los hace útiles en tratamientos contra el cáncer.

TIPO DE RADIACIÓN	ENERGIA			ORIGEN
	APROX.	EN AIRE	EN TEJIDO BLANDO	
POR PARTICULAS				
Partículas alfa	4-7 MeV	1-10 cm	< 0.1 mm	Núcleos radioactivos pesados
Partículas beta	0-7 MeV	0-10 m	0-2 cm	Núcleo radioactivo
ELECTROMAGNÉTICA				
Rayos X	0-25 MeV	0-100m	0-30 cm	Nube electrónica
Rayos gamma	0-5 MeV	0-100 m	0-30 cm	Núcleos radioactivos

Nota: *Manual de radiología para técnicos*. Stewart, 2013).

Generación y Propiedades de los Rayos X

Uno de los descubrimientos más importantes en la medicina moderna, que revolucionó el diagnóstico médico fue realizado el 8 de noviembre de 1895 por Wilhelm Roentgen, los rayos X (Stewart, 2013, pág. 7).

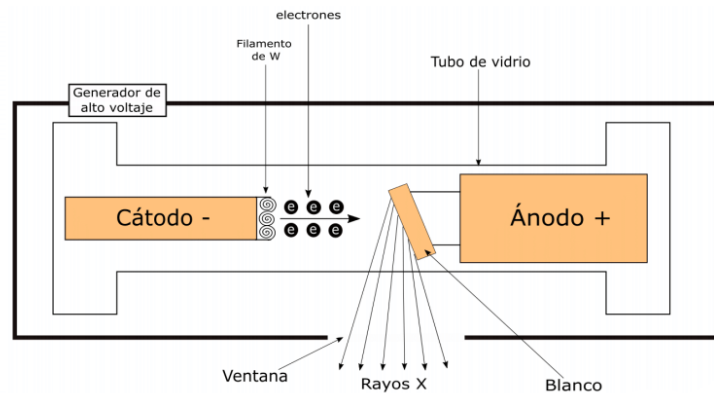
Su producción se realiza en tubos que contienen una ampolla de pyrex sellada al vacío con dos electrodos, el cátodo o polo negativo y el ánodo o polo positivo, la función principal del tubo es acelerar electrones desde el cátodo hasta el ánodo, para proporcionar un gran número de electrones enfocado en un pequeño punto del ánodo de forma que los electrones llegan al ánodo con una energía cinética (energía en movimiento).

Cuando los electrones viajan desde el cátodo al ánodo forman la corriente del tubo de rayos x, entre los dos circula una nube de electrones, que interactúan con los átomos del metal pesado del blanco (generalmente de tungsteno) transfieren su energía cinética a este, las interacciones y los rayos de frenado dan lugar a la transformación de la energía cinética en energía térmica 99% (calor) y en energía electromagnética 1% (rayos X).

El electrón proyectil, formados por el tubo interactúan con los electrones de las capas externas de los átomos del blanco, excitándolos y para regresar a su estado normal, emiten radiación infrarroja, las excitaciones y recuperaciones van a generar el calor en el tubo de rayos X, por lo que requiere un sistema de enfriamiento.

Figura 4

Tubo de Rayos X



Nota: El cátodo acelera los electrones en un punto fijo del ánodo para que interactúen con los electrones del blanco, donde se genera 99% calor y 1% de rayos x. (Jimenez, 2018).

Interacción de los Rayos X con la Materia

Resulta de varios procesos, cuando un haz de fotones (que se genera en el tubo de rayos x), interacciona con el tejido del paciente, pueden ocurrir tres situaciones diferentes:

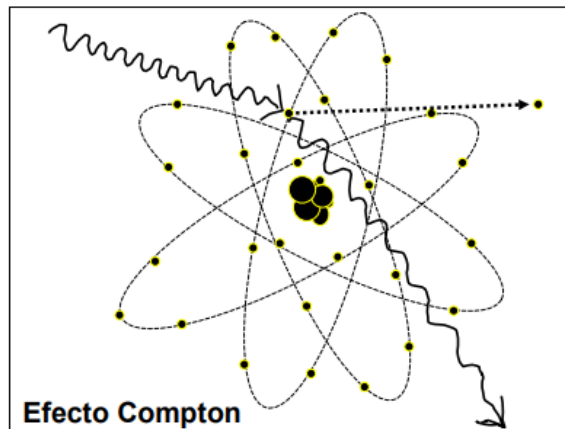
- Atravesar al paciente sin interaccionar con ningún átomo de éste: no depositará en él ninguna energía, ni efecto, aunque alcanzará la película radiográfica.
- Interaccionará con algunos de los electrones de las capas internas de los átomos del paciente, cediéndole toda la energía que transporta, y desapareciendo porque ha sido completamente absorbido.
- Interacción con los electrones corticales de los átomos del paciente en el que solo cederá una parte de la energía que transporta, continuando su camino, aunque cambiando de trayectoria e interaccionando con todo lo que se interponga en su camino.

Existen efectos físicos producidos por la interacción de los rayos X con la materia, que serán los responsables de la formación de la imagen en una película radiográfica o del efecto terapéutico en la radioterapia.

El efecto Compton: es un fenómeno en el que los rayos x de energía moderada pueden experimentar una interacción con electrones de la capa externa que no solo dispersa el fotón, sino que reduce su energía y también ioniza al átomo liberando al electrón con que interaccionó, esta interacción también da como resultado un fotón dispersado de baja energía.

Figura 5

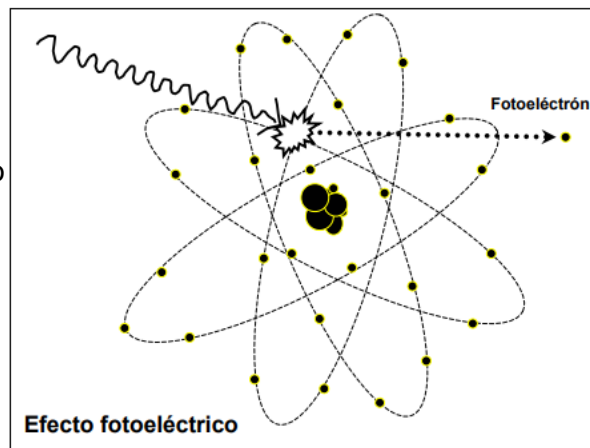
Efecto Compton



Nota: *Interacción De La Radiación Con La Materia* (Alcaraz, 2002)

El efecto fotoeléctrico: en este los rayos x experimentan interacciones de ionización con electrones de capas internas de los átomos del blanco, de forma que los rayos x no se dispersan, sino que es totalmente absorbido. El fotón incidente desaparece y el electrón de la capa K, denominado fotoeléctrico es expulsado del átomo (Arsa, 2009).

Figura 6
Efecto Fotoeléctrico



Nota: Interacción De La Radiación Con La Materia (Alcaraz, 2002)

Formación de la Imagen

En el caso de uso para fines diagnósticos un haz de rayos X incide sobre el paciente, el haz de salida seguirá un patrón dependiendo del grosor y composición de los órganos, junto con cierta radiación dispersa, el haz emergente es capturado y convertido en una imagen visible.

La cantidad de radiación que se recibe dependerá de la potencia del tubo (kilovoltaje), la corriente del tubo (miliamperaje), el tiempo de exposición, la distancia entre el tubo de rayos X y el paciente, la exposición se reduce con el cuadrado de la distancia, lo que constituye uno de los principales parámetros de protección radiológica.

En el caso de utilizar la radiación ionizante en radioterapia o medicina nuclear se estima que hasta un 50% del tratamiento para cáncer es realizado con radioterapia, por lo que requiere la colaboración estrecha de un físico médico, radioterapeuta y técnicos que deben estar altamente capacitados, para evitar efectos adversos por radiación.

Protección y Seguridad Radiológica

Con el descubrimiento de los rayos X se establecieron en el mundo los beneficios de su utilización para fines de diagnóstico y tratamiento médico, al mismo tiempo se fueron observando efectos secundarios, por lo que fue necesario establecer normas de protección y seguridad que existe en la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y cada uno de los países estable reglas propias, basadas en las creadas por esta comisión, en México el organismo encargado de la seguridad y protección radiológica, es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS).

Dentro de estas normas la Comisión Internacional de Protección Radiológica establece que no se practicarán estudios o tratamientos con radiaciones ionizantes a menos que su aplicación produzca un mayor beneficio positivo, que un riesgo a la persona irradiada.

- Las exposiciones deben mantenerse tan bajas como razonablemente sea posible (ALARA), sin afectar la nitidez o contraste de la radiografía.
- Establecer un límite de dosis para el público y para el personal ocupacionalmente expuesto (POE), llamado así a quienes en la realización de sus actividades laborales tengan un mayor riesgo de exposición a radiaciones ionizantes.
- En las personas que se encuentren embarazadas o que se sospeche, ya sea POE o público en general se debe aplicar una protección al embrión/feto.
- La política de la (ICRP) es limitar la dosis de exposiciones para tener dosis por debajo del umbral para evitar efectos estocásticos y exposiciones innecesarias a fuentes de radiación ionizante.
- La exposición médica al paciente siempre debe ser justificada y que la dosis sea conforme al propósito médico, sin pasar los límites de exposición.

El POE debe conocer y utilizar los dispositivos de protección radiológica que se encuentran en la sala de rayos x, para protegerse de la radiación dispersa, entre los que se encuentran las cortinillas plomadas, marcos plomados, mamparas entre

otros, al realizar un estudio radiológico siempre se debe emplear el colimador adecuado y evitar la repetición de estudios, para no irradiar más de lo necesario al paciente.

En la realización de estudios con fluoroscopia se debe extremar la protección, especialmente en las gónadas.

Las salas que cuenten con equipos de Rayos X deben contar con dispositivos mínimo de protección para el POE y el paciente; como:

- Mandil con un espesor de 0.5 mm de plomo.
- Guantes con espesor de 0.5 mm de plomo.
- Collarín para protección de tiroides con un espesor de 0.5 mm de plomo.
- Anteojos para la protección del cristalino es de 0.2 mm de plomo.
- Protector de gónadas de 0.5 mm de plomo.

En los estudios con fluoroscopia y en la utilización del equipo en arco en C el personal deberá utilizar un mandil plomado de 0.5 de espesor, en el caso de estudios con equipos portátiles se establecerá una distancia mínima de 1.8 m del paciente con mandil plomado, todo personal expuesto a radiaciones ionizantes deberá contar con un dosímetro personal en la parte superior del tórax y debajo del mandil, para calcular las dosis recibidas anualmente y que esté autorizado el uso del dosímetro por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

Los dosímetros personales deben colocarse durante la jornada de trabajo y al término de ésta deben permanecer almacenados en un lugar adecuado, fuera de la zona controlada.

El objetivo de la protección y seguridad radiológica es evitar los efectos deterministas y limitar los efectos estocásticos a niveles aceptables.

Para conseguir estos objetivos, se deben aplicar los principios del Sistema de Protección Radiológica propuestos por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP):

Optimización: Toda exposición a fuentes de radiaciones ionizantes deben llevarse a cabo, con dosis tan bajas como sea razonablemente posible (ALARA), y minimizar la repetición de estudios por mal posicionamiento.

Justificación: La exposición a radiación debe representar un beneficio positivo a la persona irradiada.

Límites de dosis: la ICRP basada en estudios que pueden tener un efecto biológico con la dosis recibida, ha recomendado los siguientes límites de dosis:

1. Para las personas consideradas como profesionalmente expuestas a fuentes de radiaciones ionizantes (POE), se considera un límite de 50 mSv en un año.
2. Para el público se considera un límite de 5 mSv en un año.
3. Para el POE y público en general que se encuentre embarazada el límite de exposición es 15 mSv/año.

Factores Básicos de Protección Radiológica

Los riesgos de irradiación a que están sometidos las personas se reducen aplicando las siguientes medidas generales de protección:

- Distancia: alejarse de las fuentes de la radiación ionizante disminuye en la misma proporción en que aumenta el cuadrado de la distancia, entre más lejos te encuentres de la fuente de radiación menor exposición tendrás a ella.
- Tiempo: la dosis equivalente recibida disminuye con el tiempo de exposición, sin alterar la calidad del estudio radiográfico.
- Blindaje: en los casos en que los dos factores anteriores no sean suficientes, será necesario interponer un espesor de material absorbente, blindaje (regularmente de plomo), entre el operador y la fuente de radiación.
- Barreras primarias: blindaje donde incide directamente el haz de radiación útil.
- Barrera secundaria: blindaje en el cual incide sólo la radiación de fuga y la radiación dispersa.

Cantidades, Unidades y Definiciones.

La Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU) y la Comisión Internacional de Protección Radiológica establecieron definiciones formales de cantidades y unidades de radiación y radiactividad que tienen aceptación internacional.

Dosis absorbida: es la cantidad dosimétrica fundamental de la radiación ionizante, representada por la letra "D", es la energía absorbida en un medio (masa de tejido), su unidad es el joule/Kg, unidad que se le ha nombrado como Gray (Gy), en rayos x la equivalencia entre la exposición y la dosis absorbida depende de la energía y del medio con que interacciona (Cherry, 1990).

Dosis equivalente: es el daño biológico producido por las radiaciones que depende de varios factores, entre otros, de la dosis absorbida y del tipo y energía de la radiación, que es representada por la letra "H", para medir el daño biológico.

Dosis equivalente efectiva: Se define como la suma de los productos de la dosis equivalente para órganos o tejidos, y el factor de peso aplicable para cada órgano que ha sido expuesto a radiación ionizante.

La NOM-229-SSA1-2002

En México las reglas de protección y seguridad radiológica se encuentran establecidas por la norma NOM-229-SSA1-2002; basada en el reglamento General de Seguridad Radiológica y en concordancia con las normas internacionales.

En esta se establecen los lineamientos para el establecimiento y funcionamiento de los servicios con emisión de radiaciones e incluyen determinaciones respecto a instalación arquitectónica, características de los equipos, capacitación del personal que labora, instauración de normas y requisitos de protección y leyes que la regulan.

Define al Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) como la persona que con motivo de su ocupación está expuesta a la radiación ionizante, quedan excluidos los trabajadores que ocasionalmente en el curso de su trabajo puedan

estar expuestos a este tipo de radiación”. Establece para los efectos estocásticos un límite anual de dosis de 50 mSv, y para un efecto determinista de 500 mSv/año.

Para el público (personal que ocasionalmente puede estar expuesto a las radiaciones) se establece para los efectos estocásticos un límite anual de dosis de 5 mSv, y para un efecto determinista es de 50 mSv/año.

Basados en estos límites se consideran límites de dosis semanales de 1.0 y 0.1 mSv, respectivamente, para POE y público.

En la práctica, el promedio de dosis anual que se recibe en Radiología Médica en México está por debajo de los 10 mSv al año (Saravia, 2013).

DISPOSITIVOS MINIMOS REQUERIDOS DE PROTECCION RADIOLOGICA	
Sala de aplicación	Mínimo por sala
Radiología convencional	Mandil plomado, guantes plomados, protector de gónadas, collarín plomado
Fluoroscopia	Mandil plomado, guantes plomados, protector de gónadas, collarín plomado, lentes plomados
Hemodinamia	Mandil plomado, guantes plomados, collarín plomado, anteojos plomados
Tomografía	Mandil plomado, collarín plomado, guantes plomados
Mamografía	No se requiere
Panorámica dental	No se requiere

Nota: Medidas Básicas De Protección Radiológica. *Instituto Nacional De Cancerología* (Preciado, y Luna 2010).

Dosimetría Personal

El dosímetro tiene como finalidad determinar las dosis recibidas por el organismo, utilizándose para ello dosímetros personales que acompañan al trabajador y quedan expuestos a la radiación en las mismas condiciones, generalmente son dispositivos de termoluminiscencia a los que se les realiza lectura mensual en un servicio de asesores especializados en seguridad y protección radiológica, avalados por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) y con registro ante el órgano regulador La Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS).

Las magnitudes de protección fundamentales adoptadas por la ICRP están basadas en la medición de la energía depositada en órganos y tejidos del cuerpo humano. Para relacionar la dosis de radiación al riesgo de esta (el detrimento), también es necesario tener en cuenta tanto las variaciones en la eficacia biológica de las radiaciones de diferente calidad, así como la diferencia en la sensibilidad de órganos y tejidos a la radiación ionizante (radiosensibilidad).

Normas Generales de Protección Radiológica Respecto a los Pacientes

- Elegir los parámetros (kVp, filtro) adecuados al espesor del paciente y el contraste necesario.
- El tamaño del campo será el menor posible, deberá estar centrado y se cuidará la alineación del tubo y rejilla antidifusora.
- Elegir el sistema de imagen adecuado, de forma que produzca la mejor imagen con el mínimo de exposición para el paciente.
- Reducción del número de exploraciones repetidas por errores de posicionamiento.
- A las mujeres en edad fértil se les deberá preguntar sobre la posibilidad de estar embarazadas.

Normas de Trabajo en Salas de Rayos X.

- Las puertas de la sala de exploración deben permanecer cerradas mientras se están utilizando los equipos de rayos X (RX).
- No se debe dirigir el haz de rayos X hacia el puesto de control, ventanas, etc.
- Durante los períodos de irradiación (radiografía) todo el personal debe permanecer en la zona blindada.
- El tiempo de examen y el tamaño del campo de irradiación serán los mínimos necesarios. La distancia del foco de rayos X a la superficie del paciente no será inferior a 45 cm.
- Se le proporcionara al paciente protector de gónadas siempre que sea necesario, especialmente en el caso de niños.
- Ningún paciente debe vestirse en la sala de RX o permanecer en ella mientras a otro paciente se le esté haciendo un examen radiológico.
- Deben colocarse los letreros establecidos en la normatividad, dentro de la sala la leyenda “en esta sala solo debe permanecer un paciente a la vez”, en la puerta de las salas “peligro radiaciones ionizantes”, “si está embarazada o sospecha de embarazo favor informar al técnico de radiólogo.”
- En la entrada de la sala debe colocar un foco rojo que se encienda en caso de emisión de radiaciones.

Además, las instalaciones en donde se emitan radiaciones deberán cubrir los requerimientos referidos en la norma como plomado de las paredes, instalación de equipos de alta frecuencia que cuenten con barreras primarias de protección como colimador, rejillas antidifusoras, cortinilla plomada y mantenimientos preventivos constantes para prevenir o limitar daños al tubo emisor de rayos X.

Interacción de la Radiación con la Célula y sus Componentes: Respuesta a Nivel Molecular y Celular.

La unidad básica del organismo vivo es la célula, los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes derivan del daño que éstas producen en la estructura química de las células, fundamentalmente en la molécula de ADN (CSN, 2013).

Las trayectorias de radiación pueden depositar energía directamente en el ADN (efecto directo), o pueden ionizar otras moléculas de la célula especialmente las moléculas de agua, para formar radicales libres que pueden dañar al ADN (efecto indirecto). La incidencia o severidad del resultado está relacionado con la dosis absorbida por el sistema, existen dos tipos de efectos relacionados con la dosis, somáticos y genéticos, el somático se refiere al que ocurre en los tejidos del individuo irradiado y el daño genético al que afectará a las generaciones futuras.

La radiosensibilidad del tejido depende de varios factores: el número de células indiferenciadas en el tejido, el número de células mitóticas activas, la cantidad de tiempo que las células permanecen activas en proliferación (CSN, 2013).

Para comparar la radiosensibilidad de diferentes poblaciones celulares del organismo se pueden utilizar diversos parámetros:

- Muerte mitótica: La muerte mitótica se trata de una pérdida total de la capacidad de proliferación de la célula, aun cuando se encuentre con sus funciones vitales y aspectos morfológicos.
- Muerte en interfase: La radiación ionizante afecta a la célula antes de que entre a la división celular, la muerte de interfase ocurre en todas las células ya sea que no se divida (neuronas) o que sí, la dosis que puede provocar dicha muerte dependerá de la célula.
- Retraso mitótico: Las células que están en mitosis y la población total de dicha célula, se conoce como índice mitótico. La radiación ionizante provoca la disminución en un cierto periodo de tiempo, si la dosis es baja las células atrapadas en mitosis se pueden recuperar e inician de nuevo división celular.

Los mecanismos por los que las células sufren daños cuando se exponen a la radiación ionizante incluyen varios factores que son físicos, químicos y biológicos.

En los factores físicos se incluyen, la tasa de dosis (alta o baja) y la calidad de la radiación (transferencia lineal de energía). Todo va a depender de la tasa de dosis, si es alta provocará la muerte de la población de la célula irradiada, como también daños a la estructura del ADN, que será más difícil de reparar, pero si son con tasas de dosis bajas se puede reparar la célula dañada antes de la muerte de la célula.

Los factores químicos son sustancias que bien aumentan o disminuyen la radiosensibilidad celular.

Y en los factores biológicos el daño dependerá de la etapa de división celular, regularmente es más sensible a la radiación en etapa de mitosis, cuando el daño en las moléculas del ADN es letal solo le queda reparar el daño únicamente para sobrevivir y es eficaz cuando la célula está en estado de reposo proliferativo.

Los efectos de la radiación pueden ser agudos, es decir que aparecen poco tiempo después de la exposición a la radiación, o crónicos, que usualmente aparecen muchos años después de ser expuesto.

Efectos Biológicos de las Radiaciones Ionizantes

Efectos Somáticos: involucran primariamente a las células diploides sólo se manifiestan en el individuo que ha sido sometido a la exposición de radiaciones ionizantes, por ejemplo, el eritema, se clasifican en dos tipos, efectos de certeza relativa o determinísticos y los que ocurren al azar o estocásticos, efectos no determinísticos (Arsa, 2009).

Los efectos deterministas: dependen de la dosis de radiación, pueden variar desde la muerte en días o semanas (para niveles muy altos de radiación recibida por todo el cuerpo) a simple enrojecimiento de la piel (para dosis elevadas de radiación recibidas durante un corto período de tiempo por una zona del cuerpo de tamaño limitado). Pueden ser tempranos que ocurren durante el primer año o tardíos

que se presentan posterior a un año de la irradiación. Los tejidos más sensibles para efectos determinísticos son la médula ósea, los testículos, el cristalino.

Los efectos estocásticos o no deterministas: son aquellos que tienen una naturaleza aleatoria, es decir, es posible que si dos individuos han sido expuestos a radiación en las mismas condiciones uno de ellos presente efectos biológicos y el otro no. Son de naturaleza probabilística, influidos por muchos factores, no existe una dosis umbral demostrable y el daño aparece después de un período de latencia; entre ellos se incluyen el cáncer y las enfermedades hereditarias.

Efectos hereditarios: No se manifiestan en el individuo que ha sido expuesto a la radiación sino en su descendencia, porque se lesionan las células germinales del individuo expuesto, por ejemplo, las mutaciones genéticas, involucran a las células germinales haploides (Arsa, 2009).

A nivel molecular la radiación afecta de manera directa o indirecta, por acción directa el daño se produce como resultado de la ionización de los átomos de moléculas lo que causa inactivación o alteración funcional; la acción indirecta se lleva a cabo por la producción de radicales reactivos que al causar daño tóxico en ciertas moléculas resultará en un efecto biológico.

Efectos de las Radiaciones en los Sistemas Biológicos

Las células indiferenciadas con rápida división son las más sensibles a la radiación, entre éstas se incluyen las del sistema hematopoyético, el sistema reproductor, el sistema gastrointestinal, la piel, el cristalino.

El feto es extremadamente radiosensible y depende no solo de la dosis, sino de la edad gestacional, durante el primer trimestre el daño es mayor y podría causar aborto espontáneo en los trimestres posteriores se puede asociar a malformaciones congénitas.

En los humanos en el caso de irradiación aguda prolongada al cuerpo entero, se puede producir el síndrome de irradiación aguda, es dependiente de la dosis y se presenta en cuatro etapas; la fase inicial en la que hay una respuesta de shock, un período de latencia donde las células viables radioresistentes (CSN, 2013).

Mantienen sus funciones la enfermedad manifiesta donde aparecen los síntomas y el desenlace final que consiste en la recuperación o la muerte dependiendo del deterioro que se haya presentado.

Radiación y Embarazo

La radiación ionizante se incluye entre los agentes teratógenos por lo que es de suma importancia regular su uso y limitar la exposición de las mujeres embarazadas, sea por exposición profesional o médica.

Los agentes teratógenos pueden causar malformaciones en tres niveles, materno, placentario o fetal, pueden ser de origen intrínseco (propias del individuo) o extrínseco (medio ambiente).

El efecto que causa el teratógeno dependerá de varios factores como en que etapa del desarrollo ocurra, la dosis y tiempo de exposición, cuáles son las características y que tipo de teratógeno.

Existen estudios que han mostrado los cambios sobre la fertilidad masculina y femenina en personas expuestas a altas dosis de radiación para tratamiento de cáncer afectando el desarrollo de las células germinales, el umbral de dosis de radiación para producir esterilidad permanente en hombres se halla entre 3500 y 6000 mGy; pero no existen datos de daño a dosis bajas para uso diagnóstico y con la aplicación de los instrumentos de protección radiológica.

Las células tienen diferente sensibilidad a la radiación, en el caso del embrión debido a la diferenciación celular es muy sensible a la radiación ionizante, que se presenten alteraciones es difícil determinar si están asociadas específicamente a la exposición, porque existen muchos agentes teratógenos; la radiación puede provocar tres clases de efectos: muerte, anomalías congénitas o efectos tardíos (cáncer y defectos hereditarios).

Los efectos de la exposición prenatal a las radiaciones están relacionados con el momento en que esta ocurre:

Etapa de preimplantación son las dos primeras semanas de gestación, en esta se produce un efecto conocido como “todo o nada”, que puede ser una falla en la implantación y muerte del embrión o bien en la supervivencia de este, sin anomalías; se estima por datos experimentales que dosis de 100 – 200 mGy causan el 1 – 2 % de letalidad en esta etapa.

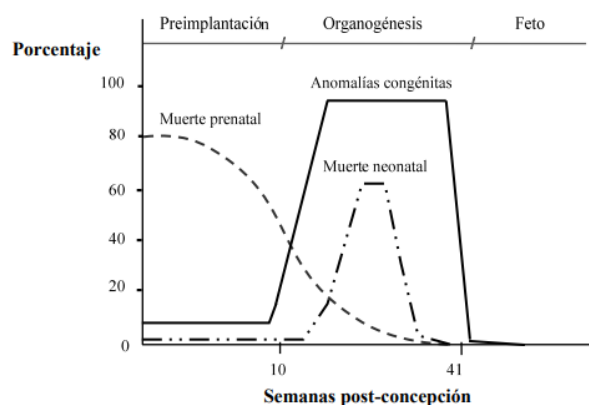
En el período de organogénesis: (semana 3 a 8) en este periodo hay una intensa proliferación celular, en modelos experimentales animales se observaron anomalías esqueléticas, oculares y genitales, así como retardo en el crecimiento, la dosis mínima requerida para causar estas alteraciones fue de 500 mGy.

En el período fetal temprano se desarrolla principalmente el sistema nervioso central, a través de una secuencia de eventos que incluyen proliferación, migración, apoptosis y diferenciación celular, por lo que se convierte en un órgano radiosensible, el retraso mental es el efecto más importante, con un umbral de exposición de 120 – 200 mGy.

Período fetal tardío es el último trimestre de gestación, aquí son más relevantes los efectos estocásticos o probabilísticos, no requiere un umbral de dosis, por lo que cualquier exposición prenatal a radiación aumenta la probabilidad de padecer cáncer, principalmente los que se presentan antes de los 15 años, esta implicación proviene de un estudio que demostró aumento en la incidencia de leucemia en niños cuyas madres habían sido sometidas a pelvimetrías durante la gestación.

Figura 7

Gráfica de Efectos de la Radiación



Nota: Aspectos Generales de la Interacción de la Radiación Con El Medio Biológico. En Curso De Supervisores De Instalaciones (CSN, 2013).

En términos generales, el National Council on Radiation Protection and Measurement considera que no existe evidencia de riesgo aumentado de anomalías fetales, retardo mental, restricción de crecimiento o pérdida del embarazo a consecuencia de radiación con dosis menores a 50 mGy (5 rads) el riesgo de malformaciones incrementa solo en dosis superiores a 150 mGy (Ortega, 2008, pág. 298).

La ICRP sugiere que para dosis fetales menores a 100 mGy, no existe justificación médica para interrumpir el embarazo debido a la exposición a radiaciones, la ACR, sugiere considerar intervenir el embarazo, en presencia de otros riesgos, cuando la irradiación al feto se produjo en las primeras 8 semanas y la dosis supera los 50 mGy.

Los estudios de radiodiagnóstico no alcanzan esas cifras de exposición.

Los estudios radiológicos más comunes tienen las siguientes cifras de exposición en pacientes adultos.

Tomografía de abdomen y pelvis	7.7 mSv
Colonografía por tomografía	6 mSv
Urografía excretora	3 mSv
Colon por enema	6 mSv
Serie esofagogastroduodenal	6 mSv
Radiografía de columna lumbar	1.4 mSv
Radiografía de extremidades	Menos de 0.0001 mSv
Tele de tórax	0.1 mSv
Tomografía de cráneo	1.6 mSv
Tomografía de columna	8.8 mSv
Panorámica dental	0.025 mSv
Mastografía	0.21 mSv

Nota: Estudios de radiodiagnóstico durante el embarazo. *Obstetricia y Ginecología* (Uribe, 2009).

La dosis de exposición al feto es difícil de determinar, en un estudio realizado en el Reino Unido en 1988 establecieron las siguientes dosis de radiación al feto en los estudios más comunes:

Exámenes con Rayos X Convencionales	Valor Medio (mGy)	Valor Máximo (mGy)
Abdomen	1.4	4.2
Tórax	<0.01	<0.01
Urografía Excretora	1.7	10
Columna Lumbar	1.7	10
Pelvis	1.1	4
Cráneo	<0.01	<0.01
Columna Torácica	<0.01	<0.01
Exámenes con Fluoroscopia	Valor Medio (mGy)	Valor Máximo (mGy)
Serie Esofagogastroduodenal	1.1	5.8
Colon por Enema	6.8	24
Tomografía Computada	Valor Medio (mGy)	Valor Máximo (mGy)
Abdomen	8.0	49
Tórax	0.06	0.96
Cabeza	< 0.005	< 0.005
Columna Lumbar	2.4	8.6
Pelvis	25	79

Nota: Estudios de radiodiagnostico durante el embarazo. *Obstetricia y Ginecologia* (Uribe, 2009).

Los efectos de la radiación ionizante en la embriogénesis no tienen características propias que permitan diferenciar de los riesgos que se generan de manera espontánea o de otros teratógenos, por ello se deben conocer otros factores de riesgos como la edad materna, hábitos nocivos, o si tuvo exposición a radiación, en qué etapa gestacional y la dosis estimada.

Si bien la mayoría de las consecuencias estudiadas o conocidas son experimentales, algunos accidentes radiactivos como las mujeres embarazadas que

sobrevivieron a las bombas atómicas de la Segunda Guerra Mundial han permitido observar lo que ocurre con una exposición alta a radiación, en el primer trimestre, tuvieron como consecuencia muerte del embrión presentado como aborto espontáneo y en gestación avanzada presentaron retraso mental.

Si se sobrepasa la dosis umbral, el daño de la radiación ionizante durante el embarazo que el resultado sea muerte celular, puede causar un amplio rango de efectos, como, por ejemplo; anomalías del sistema nervioso central, cataratas, retraso en el crecimiento, malformaciones e incluso desorden en la conducta. Dado que el sistema nervioso central es el más sensible.

En el caso de que se necesario someter a una mujer embarazada a radiación ionizante debemos tener en cuenta dos individuos; primero la madre que puede recibir un beneficio directo y el embrión/feto puede quedar expuesto sin un beneficio directo, pero de manera indirecta sería beneficiado con la supervivencia de la madre en caso de que estuviera en riesgo.

La situación es más complicada en el caso de mujeres que no están segura de estar embarazada o no sabe que lo está, si son regulares en su período menstrual se deben contemplar como embarazadas, se deberá explicar a la paciente el riesgo de la radiación, intentar sustituir el estudio por otro que no emita radiaciones ionizantes como el ultrasonido o la resonancia magnética y en caso necesario seguir las normas de protección radiológica.

En el caso de las mujeres embarazadas que por motivos laborales estén expuestas a radiación no existen indicaciones para realizar la interrupción de las labores siempre que las dosis de exposición al feto sean menores a 1mGy, este límite es aplicado al feto y no corresponde con la medición realizada en el dosímetro personal, la trabajadora tendrá la responsabilidad de informarlo al responsable inmediatamente que este enterada o sospeche, se puede modificar su asignación de área por ejemplo de un área de fluoroscopia o hemodinamia a radiología convencional o mastografía, además establecer condiciones que limiten su exposición a la radiación dentro de las normas establecidas y la ética y responsabilidad del área.

Conclusiones

No podría entenderse la medicina moderna sin el uso de los estudios de radiodiagnóstico, se realizan gran cantidad de ellos anualmente a nivel mundial, así como una gran cantidad de tratamientos oncológicos basados en la radioterapia, esto ha hecho que las mujeres embarazadas con o sin conocimiento de ello estén expuestas a radiación ionizante, sea como parte de una enfermedad médica o bien dentro de sus actividades laborales.

La radiación ionizante se encuentra dentro de los agentes teratógenos, sus efectos en el desarrollo humano van a depender de la dosis recibida y la etapa gestacional en la que ocurra la exposición.

La embriogénesis ocurre desde la fecundación hasta el nacimiento, transcurren diferentes etapas en las que por su gran actividad celular son consideradas altamente radiosensibles, durante las dos primeras semanas de gestación el mayor riesgo de exposición a la radiación es el aborto espontáneo, la mayor cantidad de malformaciones ocurren en la etapa de organogénesis de la semana 3 a la 8 entre las que se incluyen malformaciones oculares, esqueléticas, genitales y de retardo en el crecimiento, en las etapas fetales existen estudios que muestran alteraciones como retraso mental y presentación de cáncer en menores de 15 años.

La presentación de estas alteraciones está limitada por dosis umbral, establecida por la IRCP como 100 mGy, se ha considerado que dosis menores a 50 mGy no condicionan alteración alguna durante el embarazo, es importante considerar que en los estudios de diagnóstico realizados de manera más frecuente no se alcanza el umbral de la dosis de radiación.

Las alteraciones que se producen en el embrión se deben a la radiosensibilidad que presentan las células, entre las más radiosensibles encontramos el sistema hematopoyético, la piel, el cristalino, las gónadas y el sistema nervioso central.

Afortunadamente existen reglas establecidas a nivel mundial y reguladas en México por la NOM-229-SSAI-2002 para la utilización de los sistemas de emisión de radiación ionizante, como el uso de dispositivos de protección radiológica, entre las que se encuentran las barreras primarias y secundarias, incluyendo el uso de mandil plomado en caso necesario o de protector de gónadas principalmente en los niños.

Si bien en la normatividad no se establece el uso de consentimiento informado para la realización de estudios de radiología convencional, si es importante que el personal que realice el estudio este capacitado, para informar a la paciente los posibles riesgos en caso de estar embarazada, y exista la señalética establecida en la norma sobre los establecimientos que emiten radiación ionizante, cuyo letrero debe estar colocado en la puerta, de manera visible y contener la leyenda “si usted está embarazada informe al personal antes de realizarse la radiografía”.

Como está establecido por la Comisión Internacional De Protección Radiológica deben utilizarse todas las limitantes de exposición innecesaria, el estudio a realizar debe tener plena justificación del beneficio a obtener por la paciente, optimizando la exposición bajo el principio ALARA y establecer límites de dosis para el POE y público en general, además evitar la repetición de estudios por mal posicionamiento o por mala técnica radiológica.

En el caso de POE que se encuentre embarazada podrán realizar adaptaciones a sus labores, sin suspenderlas, que limiten la exposición del feto a la dosis máxima de 1 mGy.

Es responsabilidad del personal que labora en instalaciones de emisión de radiaciones, y de la mujer en edad fértil preguntar o informar la sospecha de embarazo, en el caso de existir duda posponer el estudio hasta la realización de una prueba confirmatoria.

No realizar exposición innecesaria a una mujer embarazada, si el diagnóstico o tratamiento sean requeridos para el beneficio de la paciente debe realizarse

manera usual, siguiendo las medidas de protección radiológica y bajo consentimiento del paciente.

Explicar a la paciente las posibles consecuencias por la exposición y sugerir exámenes que no generen radiación ionizante, como ecografía o resonancia magnética, o bien realizar el estudio utilizando las medidas de protección radiológica establecidas.

Por ello es importante respetar las medidas de protección radiológica y los límites de exposición que establece la Comisión Internacional De Protección Radiológica, especialmente al público en general como el POE que se sospeche un embarazo, es recomendable si existe la duda que se suspenda el estudio hasta confirmar si está embarazada o no, y el periodo de gestación del embrión, pero si existe más beneficio-riesgo informar al paciente los efectos de la radiación ionizante.

Referencias

Alcaraz. M. (2002). Interacción de la radiación con la materia. Bases físicas y biológicas del radiodiagnóstico médico, 1-7.

Ángeles, G. V. (2010). La protección y seguridad radiológica en el NIN. Contribuciones del instituto nacional de investigaciones nucleares al avance de la ciencia y la tecnología en México, 135-151.

Arsa (2009). Protección y seguridad radiológica en el diagnóstico con rayos X. Asesores en radiaciones, 1-77.

Arteaga, G. (2013). Embriología humana y biología del desarrollo. México: Medica panamericana.

Aspectos generales de la interacción de la radiación con el medio biológico. (2013). Curso de supervisores de instalaciones radiactivas, 1-29.

Bruce. C. (2014). Embriología humana y biología del desarrollo. Michigan: Elsevier.

Cancio, R. (2007). Las recomendaciones de la comisión internacional de protección radiológica. España: Senda Editorial S.A.

Castillo. A. (2011). Anatomía y fisiología del aparato reproductor femenino y de la mama. Complejo hospitalario universitario de Albacete, 1- 14.

Cherry. R. (1990). Radiaciones ionizantes. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, 1 - 46.

Ciallella, & Hernando. (2000). Embarazo e irradiación médica. Comisión internacional de protección radiológica.

Cuartero. E. (2008). Radiología y embarazo una situación delicada. Seram, 1-11.

Diferenciación celular y organogénesis. (17 de junio de 2019). Obtenido de Diferenciación Celular y Organogénesis: <http://ac-biologia.blogspot.com/2013/08/diferenciacion-celular.html>

Dorado. (2012). Protección radiológica. Consejo de seguridad nuclear, 5- 20.

González, R. (2011). Fenómenos nucleares y sus aplicaciones energía, medicina, industrias. Uruguay: Dirac.

Gregorio. 2011). Publicación 105 Del ICRP. Argentina: Copyright.

Gutiérrez, A. (2018). Fecundación humana aspectos moleculares. Universidad de ciencias médicas de granma, 1260-1277.

Jiménez. (22 de diciembre de 2018). Researchgate.net. Obtenido de Researchgate.net: https://www.researchgate.net/figure/Figura-35-Tubo-convencional-de-rayos-X- sitesgooglecom_fig20_329871315

Nosetto.B. (2002). Seguridad radiológica. Revista de la sociedad argentina de radioprotección, 36 - 48.

Olguín, E. (01 de agosto de 2015). Salud y medicina. Obtenido de salud y medicina: <https://es.slideshare.net/luisemmaespin/organognesis-51173614>

Organización mundial de la salud. (29 de abril de 2016). Obtenido de organización mundial de la salud: www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measure

Ortega, Silva. (2008). Radiología diagnóstica en la embarazadas. Consideraciones sobre exposición a radiación y riesgo del feto, 98-303.

Pérez. (2001). Efecto de las radiaciones ionizantes en las distintas etapas del desarrollo embrio-fetal. Radioprotección sobre exposición prenatal a las radiaciones ionizantes, 123-128.

Persaud. M. (2004). Embriología clínica. España: Elsevier Saunders.

Preciado, y Luna. (2010). Medidas básicas de protección radiológica. Instituto nacional de cancerología, México D.F., 25-30.

Rojas. (2007). Embriología humana. Facultad de medicina programa de anatomía y biología del desarrollo, 4-98.

Saravia. G. (2013). Protección y seguridad radiológica. Anales de radiología México, 105-110.

Seguridad Nuclear, C. (2013). Tema 7 Aspectos generales de la interacción de la radiación con el medio biológico. En curso de supervisores de instalaciones radiactiva, 1-29.

Stewart. (2013). Manual de radiología para técnicos. España: Elsevier.

Uribe. R. (2009). Estudios de radiodiagnóstico durante el embarazo. Obstetricia y ginecología, 117 - 122.