

**ANÁLISIS DE VIABILIDAD FINANCIERA DE UNA PLANTA DE IRRADIACIÓN DE
ALIMENTOS EN PUERTO RICO**

Por

José Víctor Prado Martínez

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS
en
ECONOMÍA AGRÍCOLA

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2017

Aprobada por:

Alwin J. Jiménez Maldonado, Ph. D.
Presidente, Comité Graduado

Fecha

Mario J. Barragán Arce, Ph. D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Elvin Román Paoli, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

María L. Plaza Delestre, Ph.D.
Representante, Estudios Graduados

Fecha

Alwin J. Jiménez Maldonado, Ph. D.
Director de Departamento

Fecha

ABSTRACT

Irradiation is one of the emerging technologies identified in the short, medium and long term to conserve food. For example the use of irradiation of food provide opportunities, to reduce phytosanitary barriers, increase quality generating new market opportunities for local farmers on the island. In this study, a two-stage financial evaluation was carried out for the purpose of using cobalt irradiation system 60 and X-rays to increase the shelf life of fruits and vegetables. The methodology used was to acquire the investment and operating costs of both irradiation methods. This was achieved contacting experts in the field and suppliers, to adjust and update costs. Potentially determine the demand for irradiation services that make feasible the implementation of an irradiation plant in Puerto Rico. The project, is establishes with an average of 15,000 tons (fruits, grains, grains), with future options to exceed 40,000 tons. The use of traditional financial tools such as net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) were included as outputs variables in the model. Also a sensitivity analysis was used to identify the most relevant variables. Frequency distributions were calculated to these variables using Monte Carlo simulations with 10,000 iterations, to identify risk and cash flows volatility. Once volatility is calculated for both projects, an uncertainty was incorporated in the analysis to reduce risk. The investment for cobalt 60 plant is \$ 4 million and for X-rays is \$ 7.2 million. For both projects, a $NPV > 0$ is obtained, from \$ 4.8 million for cobalt 60 with a TIR of 17%, \$ 1 million for X-rays with a TIR of 7%, with prices of \$ 0.10 / kg in both cases. The cost of production per kg is higher by almost 50% for X-rays compared to Cobalt 60. The price and the volume of products to be irradiated are the most impactful results. It is low risk for both projects; the probability of obtaining a positive NPV is 99.8% for Cobalt 60 and 87.5% for X-rays, obtaining

a volatility of 20% for both cases. The evaluation of the actual option of deferring the risk-reducing investment for two years has a low cost for both investments, \$ 0.29 million for cobalt 60 and \$ 0.78 million for X-rays. For the type of business to be implemented the project , It is advisable to choose irradiations with X-rays in Puerto Rico, although the investment and the price are higher, but generates greater benefits due to the characteristics of the agricultural industry.

RESUMEN

La irradiación es una de las tecnologías emergentes identificadas a corto, mediano y largo plazo para conservar los alimentos. Por ejemplo, el uso de la irradiación de alimentos proporciona oportunidades, reducir las barreras fitosanitarias, aumentar la calidad generando nuevas oportunidades de mercado para los agricultores locales en la isla. En este estudio se realizó una evaluación financiera en dos etapas con el propósito de utilizar el sistema de irradiación con cobalto 60 y los rayos X para aumentar la vida de la cáscara de las frutas y hortalizas. La metodología utilizada fue la adquisición de los costos de inversión y operación de ambos métodos de irradiación. Esto se logró ponerse en contacto con expertos en el campo y proveedores, para ajustar y actualizar los costos. Potencialmente determinar la demanda de servicios de irradiación que viabilicen la implantación de una planta de irradiación en Puerto Rico. El proyecto, se establece con un promedio de 15.000 toneladas (frutas, granos, granos), con opciones futuras para superar las 40.000 toneladas. El uso de instrumentos financieros tradicionales como el valor presente neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) se incluyeron como variables de salida en el modelo. También se utilizó un análisis de sensibilidad para identificar las variables más relevantes. Las distribuciones de frecuencia se calcularon a estas variables utilizando simulaciones de Monte Carlo con 10.000 iteraciones, para identificar el riesgo y la volatilidad de los flujos de efectivo. Una vez que se calcula la volatilidad para ambos proyectos, se incorporó una incertidumbre en el análisis para reducir el riesgo. La inversión para la planta del cobalto 60 es \$ 4 millones y para los rayos X es \$ 7.2 millones. Para ambos proyectos se obtiene una $VPN > 0$, de \$ 4.8 millones para el cobalto 60 con un TIR del 17%, \$ 1 millón para los rayos X con un TIR del 7%, con precios de \$ 0,10 / kg en ambos casos. El costo de producción por kg es más alto en casi el 50% para los rayos X en comparación con el Cobalto

60. El precio y el volumen a irradiar son los resultados más impactantes. Es de bajo riesgo para ambos proyectos, la probabilidad de obtener un VPN positivo es de 99,8% para Cobalto 60 y 87,5% para radiografías, obteniendo una volatilidad del 20% para ambos casos. La evaluación de la opción real de diferir la inversión que reduce el riesgo durante dos años tiene un costo bajo para ambas inversiones, \$ 0.29 millones para el cobalto 60 y \$ 0.78 millones para los rayos X. Para el tipo de negocio a ser implementado el proyecto, es recomendable escoger irradiaciones con rayos X en Puerto Rico, aunque la inversión y el precio son mayores, pero genera mayores beneficios debido a las características de la industria agrícola.

DEDICATORIA

A mi familia que han estado siempre en los momentos de lucha a mi lado y que me han otorgado su apoyo directa o indirectamente, en el desarrollo de mi formación.

A mi esposa, Carmen Paredes, por apoyarme en todo momento.

Para ellos, con mucho cariño les dedico este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de realizar este trabajo y ser mi apoyo espiritual en todo momento.

Al Dr. Mario Julio Barragán y su familia, por el apoyo en todo el período de estudio de la maestría y el asesoramiento de la tesis, por darme la oportunidad de desarrollar proyectos de investigación agrícola, consejos y dedicación de su valioso tiempo.

Al Dr. Alwin Jiménez, por ser miembro de comité de la tesis y como director de departamento, brindando su apoyo y manteniendo las puertas abiertas al estudiante.

Al Dr. Elvin Román Paoli, por ser miembro de comité de la tesis, por su apoyo y por brindarme la oportunidad de desarrollar proyectos de investigación.

A la Universidad de Puerto Rico por abrirme sus puertas y por brindarme la oportunidad de realizar estudios de maestría.

TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE TABLAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS	xiii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Las exportaciones agrícolas en Puerto Rico.....	5
2.2 Barreras fitosanitarias a la exportación de frutas hacia Estados Unidos.....	6
2.3 La irradiación como una alternativa para franquear barreras fitosanitarias	8
2.4 La viabilidad financiera de la irradiación.....	10
2.5 Nociones básicas de irradiación	11
2.5.1 Definición de términos técnicos.....	11
2.5.2 Fundamentos de la irradiación	13
2.5.3 Aplicaciones de irradiaciones de alimentos.....	15
2.5.4 Dosis baja (menor a 1 KGy)	15
2.5.5 Dosis media (entre 1 y 10 KGy)	16
2.5.6 Dosis alta (mayor a 10 KGy)	18
2.6 Fuentes alternativas de irradiación.....	18
2.6.1 Irradiación gamma	18

2.6.2	Tecnología de irradiación por corriente de electrones (e-beam)	23
2.6.3	Tecnología de irradiación por rayos X.....	23
2.7	Percepción de la población y del consumidor sobre la irradiación	24
2.8	Regulación en los Estados Unidos	27
3	OBJETIVOS	28
3.1	Objetivo general	28
3.2	Objetivos específicos.....	28
4	METODOLOGÍA.....	29
4.1	Metodología para estimar la inversión y los costos operativos.....	29
4.2	Metodología para estimar la demanda	30
4.3	Metodología para evaluar el proyecto financieramente	31
4.4	Metodología para estimar el impacto del riesgo	35
4.5	Metodología para estimar el valor de la flexibilidad.....	37
4.5.1	Valoración de opciones mediante el método binomial	39
4.5.2	Opciones reales y evaluación en proyectos de inversión.....	42
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
5.1	Resultados de la estimación de la inversión y los costos operativos	45
5.1.1	Planta cobalto 60.....	45
5.1.2	Planta rayos X.....	47
5.2	Resultados de la estimación de la demanda	49

5.3	Resultados de la evaluación financiera del proyecto	53
5.4	Resultados de la estimación del impacto del riesgo	57
5.4.1	Planta cobalto 60.....	57
5.4.2	Planta rayos X	58
5.4.3	Punto de equilibrio	59
5.4.4	Análisis de Monte Carlo	60
5.4.5	Planta cobalto 60.....	60
5.4.6	Planta rayos X	61
5.5	Resultados de la estimación del valor de la opción de diferir un año	62
5.5.1	Planta de cobalto 60	62
5.5.2	Planta de rayos X	67
6	CONCLUSIONES.....	71
7	RECOMENDACIONES	74
8	LITERATURA CITADA	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Costos de tratamientos fitosanitarios para frutas y verduras	10
Tabla 5.1 Inversión planta cobalto 60.....	46
Tabla 5.2 Costos directos anuales planta cobalto 60	46
Tabla 5.3 Costos indirectos anuales planta cobalto 60	47
Tabla 5.4 Inversión planta rayos X.....	47
Tabla 5.5 Costos directos anuales para planta rayos X.....	48
Tabla 5.6 Costos indirectos anuales planta rayos X	48
Tabla 5.7 Costos de electricidad para Puerto Rico para planta rayos X.....	49
Tabla 5.8 Producción de algunas frutas importantes de Puerto Rico	52
Tabla 5.9 Flujo de caja, VPN y TIR de planta de cobalto 60	54
Tabla 5.10 Flujo de caja, VPN y TIR de planta de rayos X	55
Tabla 5.11 Resultados de evaluación financiera cobalto 60 y rayos X	56
Tabla 5.12 Resumen análisis de sensibilidad (VPN) planta cobalto 60	58
Tabla 5.13 Resumen análisis de sensibilidad (VPN) planta rayos X.....	59
Tabla 5.14 Puntos de equilibrio del precio y la cantidad irradiada.....	60
Tabla 5.15 Resumen de resultados de opción de diferir – cobalto 60	67
Tabla 5.16 Resumen de resultados de opción de diferir – rayos X.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Exportaciones agrícolas de Puerto Rico.....	5
Figura 2.2 Importaciones de frutas y vegetales a los EE.UU.	6
Figura 2.3 Espectro electromagnético.....	15
Figura 2.4 Rejilla de lingotes de cobalto 60	20
Figura 2.5 Componentes de una planta de irradiación.....	22
Figura 4.1 Láttice o malla binomial	41
Figura 5.1 Distribución del VPN para la planta de cobalto 60	61
Figura 5.2 Distribución del VPN para la planta de rayos X	62
Figura 5.3 Árbol binomial opción de diferir – cobalto 60	64
Figura 5.4 Árbol binomial opción de diferir – rayos X	69

LISTA DE ABREVIATURAS

APHIS	Animal and Plant Health Inspection Service
BMP	Buenas Prácticas de Manufactura
Bq	Becquerel
C	Coulomb
Ci	Curie
D	Factor de reducción del valor (del inglés "down")
Dps	Desintegraciones por Segundo
E	Valor Neto extendido del proyecto incluyendo el valor de la opción
EEUU	Estados Unidos
EPA	Environmental Protection Agency
FAO	Food and Agriculture Organization
FCD	Flujo de Caja Descontado
Gy	Gray
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Points
IAEA	International Atomic Energy Agency
IRR	Internal Rate of Return (ver también TIR)
keV	Kilo-electrovoltio
kW	Kilo Watt
MeV	Mega-electrovoltio
OMC	Organización Mundial de la Salud (ver también WHO)
P	Probabilidad de que el valor suba
PR	Puerto Rico
R	Tasa de descuento relevante sin flexibilidad

r_f	Tasa de interés libre de riesgo
SI	Sistema Internacional
U	Factor de aumento de valor (del inglés "up")
V	1. Volt. 2. Valor presente sin flexibilidad.
VAN	Valor Actual Neto (ver también VPN)
VPN	Valor Presente Neto (ver también VAN)
VPNE	Valor Presente Neto Extendido (ver también E)
USDA	United States Department of Agriculture
TIR	Tasa Interna de Retorno (ver también IRR)
WHO	World Health Organization (ver también OMC)

1 INTRODUCCIÓN

Las exportaciones agrícolas son un motor importante del desarrollo. Sin embargo, prevalece una serie de impedimentos y barreras fitosanitarias al libre tránsito de estos productos en los mercados internacionales. Existe, por tanto, una necesidad de eliminar estos cuellos de botella o impedimentos a la exportación de bienes agrícolas. La irradiación se constituye en una alternativa atractiva como tratamiento que permite eliminar barreras fitosanitarias a las exportaciones agrícolas. Esta tecnología cuenta además con varias ventajas respecto a tratamientos químicos, como la aplicación de fosfuro de aluminio de granos almacenados y físicos, como el tratamiento térmico del mango.

El beneficio tecnológico de la irradiación de alimentos ha permitido desarrollar mercados exitosos para la exportación de productos agrícolas. Por ejemplo, en Hawái se aplicaba bromuro de metilo a la papaya como medida cuarentenaria (Johnson y Malcote, 1999). Sin embargo, a partir de 1984, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), eliminó dicho procedimiento. Con la adopción del protocolo de Montreal, la irradiación de frutas, como el mango, melón, sandía, entre otros, por tanto, se constituyó en una alternativa tecnológica que abrió el mercado de Estados Unidos Continental a las frutas y verduras de Hawái (Moy y Wong, 2002).

El caso de los cítricos en Uruguay es otro ejemplo importante a citar. La irradiación permitió a productores uruguayos responder a las exigencias fitosanitarias que adoptarían la Unión Europea para protegerse de la cancrisis (IAEA, FAO y WHO, 1993).

Por su parte, los países de Asia y la región del Pacífico analizaron los beneficios de la irradiación de alimentos para incrementar el comercio de la región. La irradiación apuntaba a obtener certificaciones para fines sanitarios y cuarentenarios. Estas expectativas reflejan la importancia que le dan dichas sociedades al rol de la irradiación en la salud pública y como parte de las buenas prácticas de manufactura (BPM) y el análisis de riesgos y puntos críticos de control (HACCP, según sus siglas en inglés) (Luckman, 2002).

África es otra región que se ha beneficiado con la irradiación de alimentos. Por ejemplo, la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO, por sus siglas en inglés) y la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés) enviaron dos misiones explicativas a varios países africanos en 1986, para evaluar el papel de la irradiación como un método para afrontar las considerables pérdidas de alimentos durante el almacenamiento, postcosecha, transporte y comercialización. Posteriormente en 1988 se desarrollaron seminarios convocados por FAO y la IAEA para informar a la comunidad científica, gobiernos y la industria de África sobre la seguridad, aplicaciones y beneficios de la irradiación de alimentos. Uno de las ventajas que se le atribuía a dicha tecnología era el potenciamiento de las exportaciones de bienes agrícolas (IAEA, 1990).

Existen varios ejemplos del rol importante que puede tener la irradiación en la apertura de mercados y en el desarrollo de los sectores agrícolas y de alimentos. Por ejemplo, la implementación de la irradiación en India ha permitido la exportación de mangos hacia Estados Unidos desde 2007. De igual manera, gracias a la implementación de irradiación en el 2009, Perú logró exportar especias y hierbas aromáticas y medicinales a mercados Europeos y de Estados Unidos (FAO y IAEA, 1995). Estos representan ejemplos de cómo algunos países están generando un mayor impacto económico con la implementación de tecnologías de irradiación.

Hoy en día existen instalaciones de irradiación de alimentos en más de 50 países (Molins, 2001). Las tecnologías utilizadas para irradiar alimentos en dichas instalaciones son tres: irradiación gamma con Cobalto 60, corriente de electrones y rayos X (Arvanitoyannis, 2010). Según la Agencia Internacional de Energía Atómica se han construido, entre sus países miembros, 200 facilidades o plantas para procesos de irradiación gamma (IAEA, 1995). Fuentes más recientes indican que esos números subestiman considerablemente la situación actual. Por ejemplo, comunicación personal con Terry Kehoe de Nordion Inc., Canadá, indica que esa empresa ha construido alrededor de 140 irradiadores alrededor del mundo. Por otro lado, también se ha incrementado el uso de acelerador de electrones como fuente de irradiación o de rayos X. Aun así, según la IAEA (2004), los irradiadores gamma son mucho más convenientes que las plantas de rayos X porque son más baratos, permiten irradiar productos no uniformes y de alta densidad, y tienen una mayor capacidad de penetración. Por todos esos motivos, el uso de irradiar alimentos con rayos gamma constituye la tecnología adecuada. Sin embargo, por ser un recurso que puede agotarse, por la percepción que tiene la sociedad sobre el impacto ambiental de tecnologías radioactivas, se suele considerar tecnologías alternativas a las que usan fuentes radioactivas (Mentzer, 1989). Por ejemplo, en el caso de Hawái, debido a la gran presión social, decidieron desechar la tecnología de rayos gamma, y optaron por el uso de “e-beams/rayos X” (Moy y Wong, 2002).

Ante estas consideraciones, en el presente estudio se evaluaron ambas tecnologías, la de rayos gamma y la de rayos X. Aunque este estudio se centró en el uso de irradiación para fines fitosanitarios, es importante notar que existe un potencial latente para desarrollar la tecnología de irradiación en otros campos de la industria, como la medicina y farmacéuticas, así como en investigaciones agrícolas, como por ejemplo en la inducción de mutaciones (Wiendl *et al.*)

2013). Otros usos potenciales incluyen la polimerización de material plástico y la descontaminación de gases y aguas residuales. Toda esta gama de usos beneficiosos de esta tecnología tienden a justificar su implementación (Chmielewski, 2006; Mittendorfer, Bierbaumer, Gratzl y Kellauer, 2002; Thongphasuk y Thongphasuk, 2012; Sabharwal, 2013).

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Las exportaciones agrícolas en Puerto Rico

Las exportaciones agrícolas de Puerto Rico son reducidas y la tendencia es disminuir. Según la Junta de Planificación de Puerto Rico (2015), durante la década del 2000 al 2010, el país exportó bienes agrícolas por un valor promedio de \$50.86 millones al año (ver Figura 2.1). Este monto representa el 0.12% del valor promedio de todas las exportaciones de Puerto Rico hacia Estados Unidos continental y la tendencia es a disminuir. Además, el valor de las exportaciones agrícolas cayó tanto que el monto exportado en el 2010 representa apenas el 30% del valor que se exportaba a principios de los años noventa.

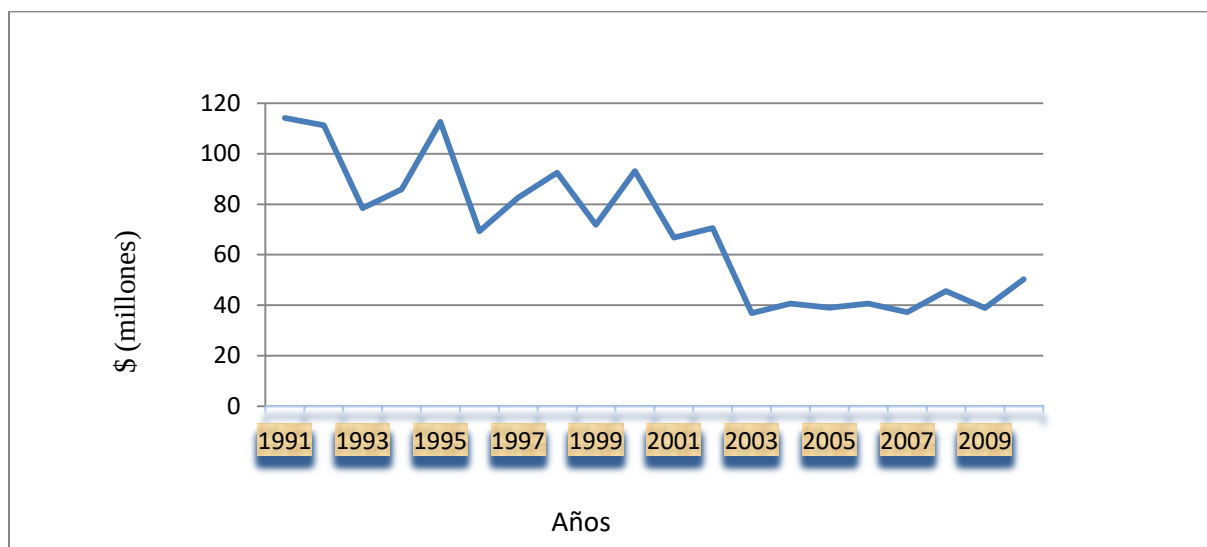


Figura 2.1 Exportaciones agrícolas de Puerto Rico.

Valor en millones de dólares de las exportaciones totales agrícolas de Puerto Rico al resto del mundo. Fuente: Modificado de Departamento de Agricultura de Puerto Rico (2015).

Al mismo tiempo, Estados Unidos continental está importando cada vez más frutas y verduras del resto del mundo. Según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) las importaciones de frutas y vegetales han incrementado en un 50% en la última década y se prevee que esta tendencia se mantendrá en el futuro (ver Figura 2.2).

Cuando se contrasta el enorme crecimiento de la demanda de frutas y verduras a nivel internacional con la caída de las exportaciones agrícolas de Puerto Rico, es natural cuestionarse a qué se puede deber la pérdida de competitividad de Puerto Rico en estos mercados.

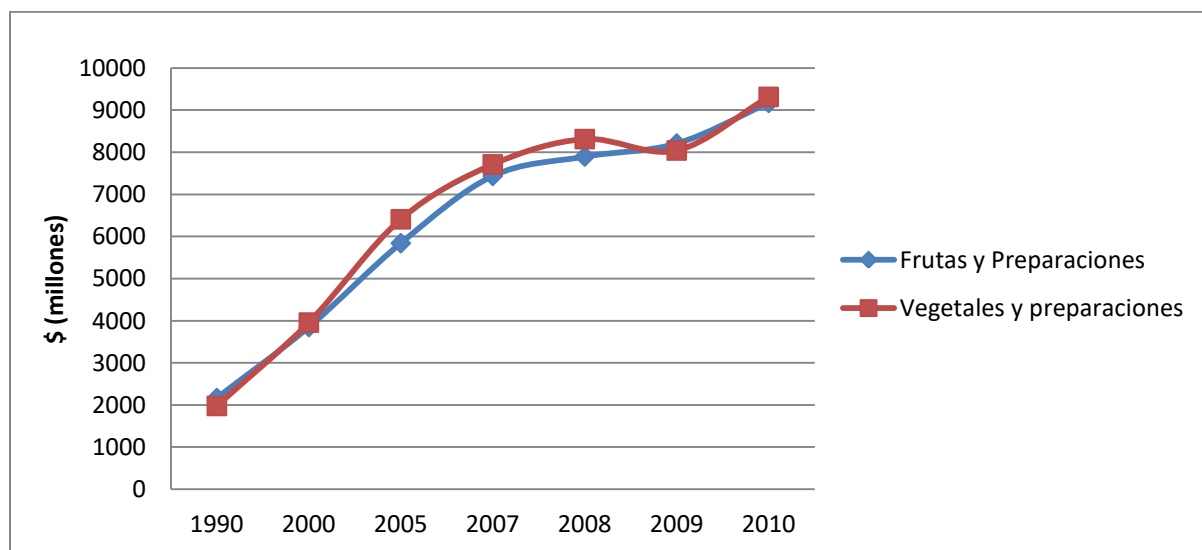


Figura 2.2 Importaciones de frutas y vegetales a los EE.UU.

Valor en millones de dólares de las importaciones de frutas y vegetales a los EE.UU. desde el resto del mundo. Fuente: Modificado de USDA (2014).

2.2 Barreras fitosanitarias a la exportación de frutas hacia Estados Unidos

Según la Organización Mundial del Comercio (1998), los países tienen el derecho a establecer sus propias normas sanitarias y fitosanitarias fundadas en principios científicos, siempre que únicamente se apliquen en la medida necesaria para proteger la salud y vida de las

personas, animales y preservar los vegetales. Entre los tratamientos cuarentenarios que cada país exige está la prohibición de importar productos que puedan ser hospederos de ciertas plagas o enfermedades. Estas restricciones forman parte de un conjunto de medidas más amplias que se suelen denominar barreras fitosanitarias.

Las barreras fitosanitarias constituyen uno de los impedimentos más grandes a la exportación de productos agrícolas de Puerto Rico al resto del mundo. Por ejemplo, gran parte de las frutas producidas en Puerto Rico son vectores de la mosca de la fruta (Jenkins y Goenaga, 2008). El Servicio de Inspección de Sanidad Animal y Vegetal (APHIS, por sus siglas en inglés) del USDA, impide la entrada de varias de estas frutas a los Estados Unidos continental para prevenir la entrada de la mosca de la fruta. Un ejemplo de las frutas que no se pueden exportar sin tratamiento aprobado desde Puerto Rico hacia los Estados Unidos continental está el mangó.

Las frutas que actualmente pueden exportarse a los Estados Unidos corren el riesgo de no poder exportarse en el futuro con la entrada de nuevas plagas. Este es el caso de, el mangó que se exporta actualmente a los Estados Unidos desde Puerto Rico el cual; debe ser sometido a un tratamiento térmico aprobado por APHIS que sirve como medida de control cuarentenario de la mosca de la fruta. Sin embargo, si el gorgojo de la semilla del mango (*Sternochetus mangiferae*) llega a Puerto Rico, el tratamiento térmico diseñado para la mosca de la fruta va a ser insuficiente como medida cuarentenaria para este nuevo invasor. De acuerdo al doctor Yair Aron (comunicación personal del 28 de marzo del 2016), Gerente de Investigación de Martex Farms, el gorgojo de la semilla del mangó ya está en el Caribe y su llegada a Puerto Rico es solo cuestión de tiempo. La entrada del gorgojo de la semilla del mango afectaría fuertemente las exportaciones de mangó de Puerto Rico. De manera similar, con la llegada de la mosca frutera

del mediterráneo (*Ceratitis capitata*) a Puerto Rico ya no se podría exportar más el mamey zapote a los Estados Unidos.

2.3 La irradiación como una alternativa para franquear barreras fitosanitarias

Por lo expuesto en la sección anterior, es necesario franquear las barreras fitosanitarias que limitan de manera importante el crecimiento de las exportaciones agrícolas de Puerto Rico y ponen en riesgo las pocas que actualmente existen. Hay varias medidas que los países importadores aprueban para franquear los impedimentos a la entrada de productos hospederos de plagas y enfermedades. Por ejemplo, es posible que el país importador apruebe, para productos específicos y orígenes de la fruta específicos, el uso de ciertos tratamientos que pueden habilitar la importación de la fruta tratada. Entre estos tratamientos están las aplicaciones químicas (fumigaciones con bromuro de metilo o fosfina), tratamientos térmicos (temperaturas altas o bajas) e irradiaciones.

La irradiación de alimentos es tal vez la alternativa más eficaz y robusta para eliminar las barreras fitosanitarias al comercio internacional de productos agrícolas. Entre los productos alimenticios que más se benefician de las ventajas de la irradiación son las hortalizas y las frutas, ya que estos productos toleran mejor la radiación (Molins, 2001; Hallman y Blackburn, 2016). Según Hallman y Blackburn (2016) el uso comercial de irradiaciones fitosanitarias se ha incrementado un 10% anual desde el año 2000. Uno de los motivos principales detrás de esta tendencia es la creciente restricción al uso de fumigantes químicos como medida cuarentenaria.

Otra de las grandes ventajas que tiene la irradiación frente a los otros tratamientos cuarentenarios es que desde el 2006 la irradiación fue decretada por el APHIS como un tratamiento genérico. Esto quiere decir que basta que una fruta tenga una cierta dosis de

irradiación para que pueda ingresar a los Estados Unidos. No es necesario, como es el caso de otras medidas cuarentenarias (e.g., el tratamiento químico o térmico), que el APHIS apruebe dicho protocolo para cada plaga, cada fruta y cada lugar de origen de la fruta. Por ejemplo, el tratamiento térmico que el APHIS aprobó para controlar la mosca de la fruta en el mangó no sirve ni para controlar el gorgojo de la semilla del mangó ni la mosca de la fruta en el mamey sapote. Sin embargo, el tratamiento de irradiación sirve tanto para la mosca de la fruta del mangó, como para la mosca de la fruta del mamey sapote y para el gorgojo de la semilla del mangó. Además, no importa si el mangó viene de Puerto Rico o de otro país; si fue irradiado con la dosis adecuada, se cumple con el control cuarentenario. En cambio el tratamiento térmico para una plaga en una fruta debe ser aprobado para cada país por separado. En ese sentido la irradiación es un tratamiento genérico y es debido a que es un tratamiento genérico que constituye una alternativa tan atractiva para países exportadores de frutas y hortalizas.

Existen otras dos características que hacen a la irradiación una alternativa atractiva frente a otros tratamientos cuarentenarios para frutas y verduras (Tabla 2.1); tiempo y calidad. En términos del tiempo; la radiación requiere unos pocos minutos comparado a un día en el caso del tratamiento de bromuro de metilo, más de un día en el caso de agua caliente, y de unos cuantos días meses en el caso del tratamiento de frío. En términos de calidad, en el caso de las frutas y verduras, a diferencia de otros tratamientos (notablemente el de calor) la irradiación no ocasiona cambios organolépticos.

Tabla 2.1 Costos de tratamientos fitosanitarios para frutas y verduras

Tratamiento	Costo (¢ /kg)	Duración Tratamiento	Calidad del product
Bromuro de metilo	2 – 14	Hasta 24 horas con aireación	Algunos alimentos perecederos son sensibles
Agua caliente	26	36 horas por lote	Puede dañar algunos productos
Tratamiento de enfriamiento	6	Días a meses, dependiendo producto	Puede dañar algunos productos
Irradiaciones	2 – 95	Pocos minutos en sistemas continuos	No experimentan cambios organolépticos

Fuente: IAEA, FAO, WHO (1993).

2.4 La viabilidad financiera de la irradiación

A diferencia de otros tratamientos cuarentenarios, la irradiación requiere de inversiones millonarias. Para que dichas inversiones sean rentables es clave contar con un volumen mínimo de producto irradiado. Según Hallman (2011) “el reto para incrementar el uso de irradiación fitosanitaria, es el costo, porque el uso comercial todavía no ha alcanzado una economía favorable de escala” (p.10). Si el volumen irradiado es pequeño, entonces el costo por unidad de producto irradiado es altísimo porque son pocas unidades de producto que tienen que pagar la inversión. En cambio, si la cantidad irradiada es considerable, la inversión se puede repartir en más unidades y el costo unitario baja considerablemente. Por eso, a diferencia de otros tratamientos, el costo unitario de la irradiación fluctúa de 2 a 95 centavos de dólar por kilo).

En Puerto Rico se desconoce si esta tecnología es financieramente viable. Por ejemplo, no se sabe cuál es el monto de la inversión, ni cuáles son los costos operacionales. Tampoco se conoce el volumen de producción mínimo para justificar la inversión, ni si Puerto Rico cuenta con ese mínimo potencial exportable. Existe por tanto una necesidad de analizar no solo la viabilidad financiera de esta tecnología, sino también estimar qué tan importante son algunas variables (como ser la cantidad irradiada) para el éxito o fracaso financiero de esta tecnología. De hecho, como la cantidad a irradiarse muy probablemente sea una de las variables más importantes e inciertas, hay que tratar de que el proyecto a evaluarse incorpore cierta flexibilidad en el diseño del proyecto de manera que éste pueda moldearse al tamaño de la demanda que se vaya haciendo efectiva a lo largo del tiempo. Por ejemplo, sería sensato esperar a que el tamaño de la demanda sea el mínimo necesario antes de invertir en el proyecto, o bien que la capacidad del proyecto pueda crecer si la demanda crece más de lo anticipado. Esos tipos de flexibilidad le dan mayor valor a un proyecto de irradiación mientras mayor sea la incertidumbre que enfrentan. Como en el caso de Puerto Rico existe bastante incertidumbre respecto al volumen que efectivamente se irradiaría, sería crucial ponerle un valor a dicha flexibilidad. Identificación de la tecnología de irradiación

2.5 Nociones básicas de irradiación

En la presente sección se hace una breve digresión para introducir nociones básicas de la tecnología de irradiación.

2.5.1 Definición de términos técnicos

Para comenzar, y siguiendo a Sommers y Fan (2006), se definen algunos términos técnicos asociados a procesos de irradiación:

Coulomb (C)	Es una unidad de medida vinculada a la cantidad de carga eléctrica que una cierta corriente transporta en un segundo.
Curie (Ci) o Becquerel (Bq)	Es la unidad de desintegración radioactiva, se define como la cantidad de sustancia radioactiva que presenta una velocidad de desintegración de 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo (dps), la unidad de radioactividad del sistema internacional (SI) es el becquerel (Bq), 1 Bq es una desintegración por segundo, $1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$.
Dosis absorbida	Cantidad de energía absorbida por el producto expuesto a una fuente de irradiación.
Gray (Gy)	Unidad de la dosis absorbida; equivalente a 1 joule por kilogramo de material.
Julio	Es una unidad que se refiere al trabajo que se requiere para transportar una carga eléctrica de un coulomb.
Radioactividad	Intensidad o poder de una fuente de irradiación gamma, como cobalto-60.
Vida media	Característica de una fuente de irradiación gamma, tiempo que tarda en desintegrarse a la mitad de su valor (la actividad de una fuente de irradiación).
Voltio	Es el nombre que recibe una unidad derivada que forma parte del

Sistema Internacional, que se utiliza para expresar el potencial eléctrico, la tensión eléctrica y la fuerza electromotriz, que equivale a la diferencia de potencial que se registra entre dos puntos de un determinado conductor cuando, para llevar de un punto al otro una carga de un coulomb, es necesario llevar acabo el trabajo de un julio.

2.5.2 Fundamentos de la irradiación

Entre las fuentes de energía ionizada autorizadas por la comisión del Codex Alimentario (2003) para irradiar alimentos, se encuentran los rayos gamma de isotopos radiactivos (como cobalto 60), electrones energéticos del acelerador de partículas y rayos X emitidos por alta energía de corrientes de electrones. Estas fuentes de irradiación transfieren su energía a través de la expulsión de electrones del átomo, lo cual puede ionizar otros átomos en cascada por colisión (Sommers y Fan, 2006). Según la IAEA (2004), si bien la energía asociada con la irradiación gamma es lo suficientemente alta como para romper los enlaces moleculares e ionizar los átomos, no es lo suficientemente alta como para afectar la estructura del átomo. Esto impide la inducción de la radioactividad. Por lo tanto, si bien estas fuentes de energía pueden generar modificaciones químicas, físicas y de propiedades biológicas, no hacen que el material irradiado llegue a ser radioactivo. La energía almacenada dentro del material es llamada dosis de energía absorbida (Arvanitoyannis, 2010).

El espectro electromagnético ilustrado en la Figura 2.3 nos provee una idea de cómo a mayor frecuencia de la radiación, mayor energía. Por ejemplo, las ondas de radio son de frecuencia muy baja y no tienen la energía suficiente como para ionizar materiales (Sommers &

Fan, 2006). En cambio, los rayos gamma están localizados en el espectro de alta energía junto con los rayos X. Los rayos X y gama pueden generar niveles de energía ionizantes y tienen un alto poder de penetración. De ahí su gran utilidad en la industria de alimentos.

El proceso de irradiación consiste en exponer el producto a una fuente de irradiación de manera intencional con el objetivo de preservar, modificar o bien mejorar sus características. Como resultado de esta exposición, una fracción de la energía de irradiación que alcanza el producto es absorbida por el producto. La cantidad de absorción va depender de la masa y composición del producto irradiado, así como del tiempo de exposición. Se requieren investigaciones previas para determinar el valor exacto de la energía de irradiación que es necesaria para alcanzar el efecto deseado. Además, como se mencionó más arriba, el material expuesto no llega a ser radiactivo por lo que puede ser manipulado normalmente (IAEA, 2006).

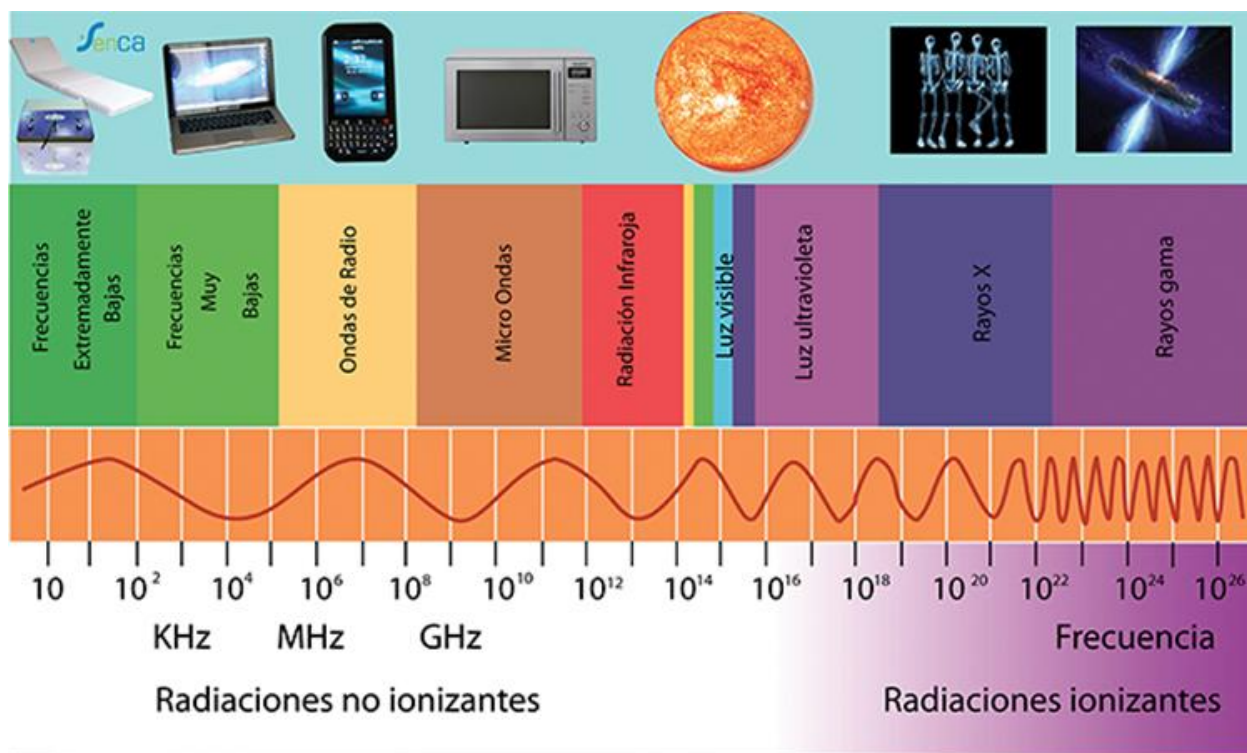


Figura 2.3 Espectro electromagnético

Fuente: <http://www.mimagnetoterapia.com/espectro-electromagnetico>.

2.5.3 Aplicaciones de irradiaciones de alimentos

Las aplicaciones de las irradiaciones de alimentos están organizadas en tres categorías acorde con las dosis aplicadas en los tratamientos.

2.5.4 Dosis baja (menor a 1 KGy)

- **Inhibición de germinación.** Varios productos como la papa, cebolla, ñame y ajo, deben ser almacenados para fines de consumo o de propagación posterior (Mostafavi, et al., 2009, citado por Ahari y Safai, 2008). Durante dicho almacenamiento es crucial evitar que el producto germine. Para este fin se suele recomendar la irradiación como una alternativa razonable cuando se la compara

con otros tratamientos como ser el de frío o el químico, que generan residuos y afectan al medio ambiente. Según el IAEA (2006), las dosis establecidas para este proceso están en el rango de 50 – 150 Gy.

- **Eliminación de insectos.** Como se vio anteriormente, los tratamientos cuarentenarios químicos y térmicos para eliminar insectos con fines cuarentenarios tienen ciertas deficiencias. Por ejemplo, de acuerdo a mi propia experiencia en trabajos realizando manejo integrado de plagas en el almacenamiento de granos, los tratamientos químicos con fosfina no eran lo suficientemente fuertes como para penetrar los huevos de algunos insectos. Por ese motivo se tenía que aplicar fosfina cada 40 a 50 días en promedio, porque el ciclo de la plaga más común para ese producto era de 35 días. Un tratamiento de irradiación no tendría este problema debido a que tiene un alto poder de penetración (Farias, Potenza, Reis y Sato, 2015). Este uso potencial de la tecnología de irradiación podría traer grandes beneficios para Puerto Rico, no solo porque eliminaría barreras fitosanitarias a las exportaciones agrícolas, sino porque también ayudaría a evitar, de una manera ambientalmente responsable, pérdidas de alimentos almacenados por concepto de ataques de plagas. Las dosis establecidas para este proceso fluctúan entre 150 y 700 Gy (Molins, 2001; IAEA, 2006).

2.5.5 Dosis media (entre 1 y 10 KGy)

- **Control de patógenos transmitidos por alimentos.** Las mayores fuentes de patógenos transmitidos por alimentos, están en los productos animales. Por ejemplo, en las carnes de res y cerdo se suele transmitir *0157:H7*, *Listeria*,

Toxoplasma gondii, *Trichinella spiralis* y *Cysticercus spp.* En las carnes de aves y huevos se suele transmitir *Salmonella spp.* y *Campylobacter*. Los tratamientos tradicionales para combatir las enfermedades provocadas por estas bacterias tienen sus limitaciones. Por ejemplo, el uso de antibióticos usados en la producción de alimentos, para tratar enfermedades en animales, ha generado resistencia en algunas bacterias como *Salmonella spp.* , *Campylobacter spp.* y coliformes. Los productos contaminados con estas bacterias resistentes son un problema en el desarrollo de enfermedades en humanos. La irradiación constituye una alternativa efectiva para inactivar estas bacterias (Steele, 2001; Hong *et al.*, 2008; Moosekian, 2014). Además, según la IAEA (2009), estudios en los Estados Unidos indican que si se informa a los consumidores de la naturaleza de la irradiación de alimentos, éstos están dispuestos a pagar hasta \$1.71/kg adicionales al precio normal de la carne por una reducción significativa en el riesgo de enfermedades transmitidas en las carnes. Este monto es mucho más alto que el costo de la irradiación. Según la OMS, la dosis para controlar patógenos transmitidos por los alimentos está entre 1 y 3 KGy.

- **Extensión de la vida útil de productos alimenticios.** La eliminación de gran parte de la población de bacterias, hongos y levaduras permite que la vida útil de los productos se extienda significativamente. Por ejemplo, cuando se irradia, las carnes blancas como el cerdo, pollo, y pescado, pueden durar un par de semanas, mientras que sin irradiar, pueden durar de 3 a 4 días. Lo mismo sucede con las frutas y los vegetales (Aguirre, Rodríguez y García, 2011; Jo, 2009; Kalyani y Manjula, 2014; Lacroix *et al.*, 2009; Miller, 2005; Nketsia-Tabiri, Adu-Gyamfi y

Bah, 2009; Sharma, Chander, Chawla y Kanatt, 2009; Skowron et al., 2013; Tahergorabi, Matak y Jaczynski, 2012; Yu y Xianwen, 2010). Para la extensión de la vida útil de productos alimenticios la dosis recomendada fluctúa entre 1 y 5 KGy (IAEA, 2006).

- **Irradiación de especias.** El proceso de la producción de especias es muy propenso a la contaminación biológica y carece de tratamientos químicos o térmicos de uso genérico. En este caso, la irradiación es una alternativa muy versátil, y es como más se la utiliza en Europa. La dosis para irradiar especias fluctúa entre 5 y 10 KGy (Miller, 2005; Sadecka, 2007).

2.5.6 Dosis alta (mayor a 10 KGy)

- **Esterilización de alimentos.** Para la esterilización de algunos alimentos, como puede ser algunas carnes, se utilizan dosis de entre 25 y 45 KGy (Miller, 2005).

2.6 Fuentes alternativas de irradiación

Según el Codex Alimentarius (2003), existen tres fuentes de radiación que pueden generar radiación ionizante y que pueden ser utilizadas en la industria de alimentos: rayos gamma, rayos X, y corriente de electrones. A continuación se detallan las características más sobresalientes de estas fuentes de irradiación.

2.6.1 Irradiación gamma

El uso comercial de la irradiación gamma para la esterilización de productos para la salud se inicia alrededor de 1950. Desde entonces, el uso de esta tecnología para el procesamiento de alimentos se ha expandido considerablemente como consecuencia de las investigaciones y las nuevas aplicaciones que se le han hallado a esta tecnología (Nordion Inc., 2016). De acuerdo al

IAEA (2004) la demanda por cobalto experimentó un aumento anual del 6% entre 1990 y el 2003. En respuesta a esta mayor demanda, los precios del cobalto aumentaron de \$1.78/Ci el año 2000 (Molins, 2001), a \$5/Ci en la actualidad (Nordion Inc, 2016).

Cobalto 60. La producción de cobalto radiactivo se inicia con el cobalto en su estado natural, isótopo cobalto-59, que es completamente estable. Este metal representa el 0.001% de la corteza de la tierra en su estado de mineral. Para conseguir el cobalto radiactivo, el cobalto-59 se funde y vacía en lingotes o cápsulas pequeñas que luego son colocadas en un reactor nuclear por un periodo de tiempo de 2 años aproximadamente. Dentro del reactor los átomos de cobalto-59 absorbe un neutrón y se convierten en cobalto-60 (IAEA, 2008).

El material de los lingotes que contienen el cobalto-60 (ver Figura 2.4) es de acero inoxidable resistente a la corrosión. Los lingotes se colocan en unas rejillas o estantes que es como se los utiliza en la planta de irradiación (IAEA, 2008; Nordion Inc. Canadá, 2016). Los dos principales proveedores de fuentes cobalto 60 o lápices de cobalto 60 están localizados en Canadá y el Reino Unido.

El cobalto 60 se desintegra poco a poco a un estado no radiactivo. El nivel de radioactividad del cobalto 60 decrece a una tasa del 12 % anual. Para mantener la capacidad del irradiador es necesario reemplazar periódicamente los lingotes de cobalto 60 (IAEA, 2004).



Figura 2.4 Rejilla de lingotes de cobalto 60

Fuente: IAEA (2008), cortesía de Nordion, Canadá (2016).

Criterios para definir el proceso de irradiación. Para la eficiente operación de una planta de irradiación hay que tomar en cuenta varios elementos a la hora de diseñar la planta. Por ejemplo, según el IAEA (2004; 2014), los siguientes son algunos de los criterios técnicos a considerarse durante el diseño del proceso:

- Tipos de productos a ser irradiados (tamaño, densidad, homogeneidad).
- Estacionalidad de los productos.

- Magnitud de la dosis y uniformidad de la dosis requerida para los productos a tratar.
- Rendimientos requeridos (la densidad de los productos puede afectar los rendimientos).
- ¿Es el irradiador parte de un proceso de manufactura, otros procesos o bien plantas que proveen servicios de irradiación?
- ¿Es el irradiador para una planta sencilla de tratamiento o bien para una planta multipropósito?
- Capital y costos operacionales totales.
- Requerimientos, y disponibilidad en la región, de algunos recursos como el agua, energía eléctrica, así como mano de obra calificada.
- Seguridad y facilidad de operación.

Componentes típicos de una planta de irradiación. Para poder estimar los requerimientos de capital y los costos operacionales de irradiar es importante tener una idea de los componentes de una planta de irradiación además de los procesos que se llevan a cabo en la planta. En la Figura 2.5 se puede observar una vista panorámica de una planta de irradiación, en la que se ennumeran claramente los siguientes componentes típicos:

1. Almacenamiento blindado (húmedo o seco, para la fuente de irradiación).
2. Mecanismo de elevación de la fuente de irradiación.
3. Protección biológica en el cuarto de irradiación.
4. Cuarto de control.
5. Empaque para los productos (acarreo).
6. Sistema de transporte del producto a través del cuarto de irradiación.

7. Control y sistema de bloqueo de seguridad.
8. Zonas de carga y descarga de los productos.
9. Servicios de equipos de soporte

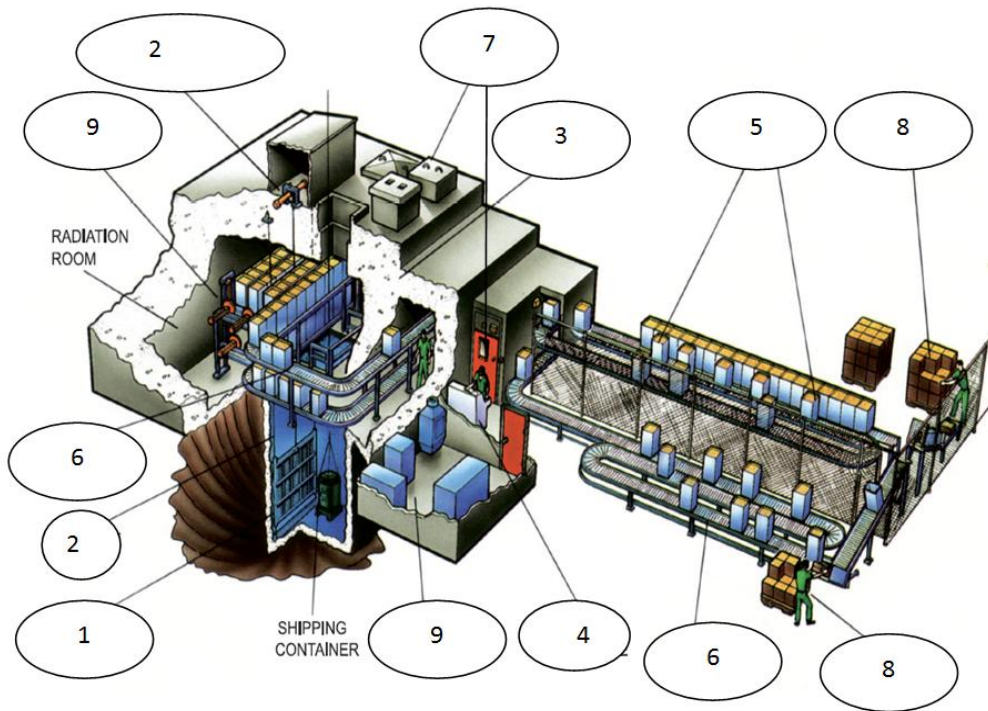


Figura 2.5 Componentes de una planta de irradiación

Fuente: IAEA (2008), cortesía de Nordion, Canadá.

Ventajas de la irradiación gamma. La irradiación gamma ofrece algunas ventajas frente a otros tratamientos. Por ejemplo, de acuerdo a la IAEA (2004), cuando se tiene en mente la esterilización de productos para la salud, la irradiación tiene las siguientes ventajas frente a las alternativas más comunes (e.g., óxido de etileno y vapor húmedo):

- El producto tratado puede ser usado inmediatamente.

- Hay un mínimo aumento de la temperatura del producto durante el proceso.
- El proceso tiene una alta penetrabilidad, lo cual permite procesar producto empacado.
- El proceso es bien preciso y de fácil control.

2.6.2 **Tecnología de irradiación por corriente de electrones (e-beam)**

La irradiación por corriente o haces de electrones (conocida como e-beam en inglés) se utiliza normalmente para el tratamiento de gases de combustión y para el tratamiento de aguas residuales a escala industrial. Esta constituye una alternativa emergente con gran potencial para ofrecer soluciones únicas para la remediación ambiental. En la medida en que se desarrollen tecnologías fiables o viables de haces de electrones de alta potencia, se espera que el uso de esta tecnología aumente aún más (Sabharwal, 2013). Como esta tecnología no suele ser utilizada en alimentos tanto como la de rayos gama o rayos X, no se considera en más detalle en la presente revisión bibliográfica.

2.6.3 **Tecnología de irradiación por rayos X**

Los equipos de rayos X utilizan un acelerador de haz de electrones que dirigen a un objetivo en una placa hecha de un material de alta densidad como tungsteno (W), acero o tantalio (Ta). Los electrones, al desacelerarse, provocan la emisión de rayos X. Estos rayos X tienen una alta capacidad de penetración, logrando irradiación en ambos lados del producto de más de 60 cm de espesor. Esto permite usar esta tecnología para procesar alimentos envasados (EPA, 2016). Sin embargo, se pierde mucha energía durante el proceso, por lo que el costo de operación es mayor al compararlo con otros irradiadores para los mismos volúmenes de producto (IAEA, 2010).

En condiciones óptimas y usando energías de 5 MeV, que está dentro del rango permitido para la irradiación de alimentos, sólo el 7.6% de la energía total del haz de electrones se convierte en rayos X. En diciembre del 2004 la Administración de Drogas y Alimentos (FDA, según sus siglas en inglés) aprobó el uso de hasta 7.5 MeV en la irradiación de alimentos. Esto puede tener un impacto significativo en la capacidad de procesamiento y en la reducción de costos de irradiación (Miller, 2005; Cleland, 2006).

En las plantas de irradiación de rayos X, el transporte del producto se realiza en contenedores que se exponen frente a las boquillas de dispersión de rayos X. Las plantas de rayos X cuentan con blindaje y enclavamientos de seguridad similares a los del irradiador gamma con cámara de irradiación y al irradiador de haz de electrones. Este tipo de planta permite un fácil control de la radiación y la distribución de la dosis puede ser similar o mejor a la que se obtiene en irradiadores gamma (Rangel, 2016).

2.7 Percepción de la población y del consumidor sobre la irradiación

Existen dos problemas de percepción que se deben tener en cuenta. **La percepción de los residentes donde se va a ubicar la planta.** Por un lado está el problema de la percepción que la población de Puerto Rico puede tener sobre la ubicación de una planta de irradiación de alimentos en su territorio. Esta percepción puede ser un problema, ya que la población puede llegar a pensar que una planta de irradiación gama puede generar serios riesgos ligados al hecho que la tecnología es atómica. Científicamente estos riesgos son ínfimos. Por ejemplo, Steele (2001) menciona que en más de 40 años de uso de esta tecnología, no existen accidentes en Norteamérica involucrados con el transporte de los tipos de isótopos radiactivos usados para la radiación. De todas formas, la percepción, infundada o no, puede ser tal que impida la

implementación de ciertas tecnologías. Este fue precisamente el caso ocurrido en Hawaii. Un estudio de este tipo de percepción puede ser importante a la hora de considerar un proyecto de irradiación en Puerto Rico. Se recomienda dejar este tipo de estudio a esfuerzos complementarios futuros. De todas formas, hay que recordar que Puerto Rico ya cuenta con varias plantas de irradiación y éstas no han creado mayores repercusiones en la opinión pública de la población. Dichas plantas de irradiación se utilizan mayormente en la industria farmacéutica y de equipo médico.

La percepción de los consumidores. El segundo problema de percepción es el del consumo de alimentos irradiados. En este caso, la preocupación no debería ser mayor ya que si gran parte del producto irradiado se destina a la exportación, la percepción del consumidor local es un tanto irrelevante. Lo que importaría sería la percepción del consumidor de Estados Unidos continental que, como se verá más adelante, una vez informado sobre la tecnología, no tiene mayores problemas en consumir producto irradiado. En todo caso, en la medida en que se quiera irradiar producto destinado al consumo local, ameritaría hacerse también un estudio de la percepción del consumidor local sobre alimentos irradiados. Este también es un trabajo que se sugiere dejar en manos de futuros trabajos complementarios al presente.

La percepción de los consumidores ante alimentos irradiados es muy diversa y flexible. Por ejemplo muchos consumidores tienen conceptos erróneos de la tecnología de alimentos irradiados. Sin embargo, cuando el método se explica, ellos normalmente toman una actitud más a favor de la tecnología (Mostafavi, Fathollahi, Motamedi & Mirmajlessi, 2010).

En el mercado de Estados Unidos, si el tratamiento ofrece una ventaja, existe una tendencia a preferir más el producto irradiado que el producto sin irradiar. Esto ha provocado que

las agencias reguladoras de los Estados Unidos promuevan la tecnología de irradiación (Moy, 2002). La aceptación de los consumidores de productos irradiados ha incrementado en los Estados Unidos, tanto para frutas tropicales frescas como para pollo y hamburguesas (Moy, 2002).

Los riesgos de consumir alimentos irradiados. Antes de ver la percepción del consumidor de los Estados Unidos continental, vale la pena ver qué dicen los estudios científicos sobre el peligro que ocasionan los productos irradiados al consumidor. La Administración de Drogas y Alimentos (FDA, por sus siglas en inglés) ha evaluado la seguridad de los alimentos irradiados. Durante más de treinta años de estudios su conclusión siempre fue que es un proceso seguro. Según la IAEA (2016), varias otras organizaciones de reconocida reputación respaldan la seguridad de los alimentos irradiados. Entre ellas se encuentran la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC, por sus siglas en inglés), el USDA, la Asociación Americana de Dietéticos, y la Asociación Americana de Médicos. Según Steele (2001), la WHO revisó 500 estudios y concluyó que la irradiación de alimentos no tiene efectos toxicológicos, microbiológicos y o pérdidas nutricionales.

De hecho, el impacto de la irradiación sobre la sanidad de los alimentos es positivo. La irradiación es una de las intervenciones más eficaces disponibles para lograr que los alimentos tengan mayor inocuidad, ya que reduce significativamente los peligros de contaminación cruzada primaria (Eustice y Brubn, 2013). Además, cuando se irradian frutas y hortalizas se obtiene una mayor inocuidad sin comprometer atributos nutricionales o sensoriales (IAEA, 2016).

2.8 Regulación en los Estados Unidos

En los Estados Unidos, la irradiación de alimentos es regulada por la FDA, porque es considerado un aditivo alimentario. Otras agencias, como el USDA/APHIS también están involucradas en la regulación porque se trata de productos frescos, frutas, cárnicos, especias, y alimentos deshidratados. La IAEA regula el tipo y diseño de la construcción de las plantas de irradiaciones. La IAEA también apoya investigaciones y la formación de comités de expertos que apoyan la implementación de dicha tecnología en los países que recién comienzan a implementarla. Por su parte, el Departamento de Transporte en los Estados Unidos (DOT por sus siglas en inglés) regula aspectos que tienen que ver con la manipulación y procedimientos de seguridad en el transporte de material radioactivo. La Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) también se constituye en un ente regulador importante. Es obligatorio etiquetar los productos irradiados y el FDA recomienda colocar en la etiqueta porque el producto ha sido irradiado. Los alimentos procesados con ingredientes irradiados no se consideran alimento irradiado (Arvanitoyannis, 2010).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

El objetivo general del estudio consiste en realizar un análisis de viabilidad financiera de una planta de irradiación de alimentos en Puerto Rico para su exportación principalmente a los Estados Unidos Continental.

3.2 Objetivos específicos

Objetivo específico 1: Estimar la inversión y los costos operacionales del proyecto.

Objetivo específico 2: Estimar la demanda de productos irradiados e identificar rubros competitivos que puedan beneficiarse de esta inversión.

Objetivo específico 3: Evaluar el proyecto financieramente.

Objetivo específico 4: Estimar el impacto del riesgo sobre el valor del proyecto.

Objetivo específico 5: Estimar el impacto de la flexibilidad sobre el valor del proyecto.

4 METODOLOGÍA

4.1 Metodología para estimar la inversión y los costos operativos

Para obtener los costos de inversión y de operación del proyecto primero se desarrolló una lista de todos los recursos que se utilizaran en el proyecto. Luego se valoraron cada uno de esos recursos a precios de mercado, entendiendo que el mejor valor alternativo de un recurso es el que se obtiene en el mercado por ese recurso. Allí donde no haya un mercado desarrollado por un recurso, se utilizaron maneras alternativas de estimar el costo de oportunidad de dicho recurso. Por ejemplo, si no hubiera un estimado del valor de mercado de la tierra, pero sí un estimado del alquiler de mercado de la tierra, se podría estimar el valor de la tierra como el valor presente de una perpetuidad de alquileres. Como se estará analizando la decisión de invertir y operar en un proyecto que todavía no existe, todos los gastos e inversiones se considerarán como evitables. En otras palabras, no existirán costos perdidos o hundidos. Solo se considerarán los costos atribuibles al proyecto.

Para obtener el precio de los recursos que entran en el proyecto de irradiación, se utilizarán dos métodos. En el método de estimación directa se usarán costos de tecnologías similares en otros países o bien de cotizaciones directas de los proveedores. Para esto será necesario realizar entrevistas a empresas proveedoras de equipos e insumos. La estimación indirecta hará uso de datos de fuentes secundarias, debidamente modificados para reflejar lo mejor posible la realidad de Puerto Rico.

4.2 Metodología para estimar la demanda

La estimación de la demanda de un bien depende de si este bien es tradicional o no tradicional. En el caso de bienes tradicionales, se suele contar con datos históricos que permiten realizar estudios cuantitativos. Dos metodologías que se utilizan en este caso son las de estudios de series de tiempo (e.g., Thomopoulos, 2015) y estudios empíricos basados en teoría (e.g., Chambers, 1988). Una manera de hacerlo es realizar estudios cuantitativos de casos similares para los cuales sí hay información, o realizar estudios cualitativos basados en los conocimientos de expertos o en marcos empíricos cualitativos basados en teoría económica. Un método destacado dentro de esta última tradición es el modelo de ventajas competitivas de Porter (1998), que se basa en principios teóricos microeconómicos. En el caso de bienes novedosos o no tradicionales, que por definición no suelen producirse, existe muy poca información para poder llevar a cabo estudios cuantitativos, es por esto que es mejor realizar estudios.

En Puerto Rico, la provisión de servicios de irradiación para fines agrícolas constituye un bien no tradicional. Por lo tanto, una manera de estimar la demanda potencial de este servicio podría ser la de estudiar casos similares para otros bienes. Por ejemplo, se podría estudiar la demanda en Puerto Rico de servicios de irradiación en la industria farmacéutica y de insumos médicos. Esta alternativa no es muy atractiva porque las características del mercado de insumos médicos son muy diferentes a las del mercado de frutas y alimentos. Otra alternativa sería la de estudiar la demanda de servicios de irradiación de alimentos en otros lugares del mundo; por ejemplo, en Hawaii o en México. El caso de México no es tan relevante para Puerto Rico porque sus costos de producción son muy bajos. En cambio, el caso de Hawaii puede ser particularmente relevante porque Hawaii tiene altos costos de producción, tiene una agricultura subtropical, es una isla, y forma parte de los Estados Unidos. El método que se utilizó en el presente estudio fue

el cualitativo basado en la opinión de expertos y el marco empírico de Porter. Para estos fines, se consultaron expertos que permitieron dimensionar la demanda de servicios de irradiación por parte de productores de mango, de cultivos nuevos altamente rentables como el achachairú, y de granos producidos localmente y que requieren de un proceso de almacenamiento.

4.3 Metodología para evaluar el proyecto financieramente

El método utilizado para evaluar financieramente el proyecto fue el del Valor Presente Neto (VPN), también denominado Valor Actual Neto (VAN). Este método consistió en resumir el valor de todo el proyecto en un solo número. Las palabras "Presente" y "Actual" reflejan el hecho que dicho valor está expresado en moneda actual. Implícito en estas palabras está el reconocimiento de que el dinero tiene diferente valor a lo largo del tiempo. Es decir, un dólar hoy día no vale lo mismo que un dólar mañana. Para poder sumar toda la moneda o el ingreso generados por el proyecto a lo largo del tiempo, hay que ponerlos primero al valor presente. De otra forma, no sería posible sumar la moneda de hoy con las monedas de otros años, porque sería como sumar dos términos distintos, por ejemplo, peras con manzanas.

Valor futuro. Para poder traducir la moneda de otros años a moneda actual se utilizó un factor de descuento, el cual depende de la tasa de descuento o tasa de interés. El motivo para hacer esto es sencillo: Como por ejemplo, si se deposita dos pesos en un banco a la tasa de interés 10%, entonces dentro de un año se tendrá \$2.2. Bajo este principio, \$2 hoy equivalen a \$2.2 el próximo año. Es decir, \$2 multiplicados por 1.1, donde el 1.0 indica que me devuelven el 100% de lo que se invirtió puse, y el 0.1 indica que además me devuelve el 10%.

Valor presente. ¿A cuántos dólares de hoy equivalen dos dólares el próximo año? Podemos utilizar el mismo razonamiento anterior para reformular la pregunta de la siguiente

manera: ¿Cuánto debo depositar en el banco hoy para tener dos dólares el próximo año? Si la tasa de interés es del 10%, sabemos que cualquiera que sea ese monto, que le podemos llamar VP (de Valor Presente), en un año valdrá $VP \times 1.1$, que deberá ser igual a 2 dólares. Es decir, tenemos la ecuación $VP \times 1.1 = 2$. Para encontrar VP sencillamente divido ambos lados de la igualdad entre 1.1 y obtengo: $VP = (2/1.1)$ o, lo que es lo mismo, $VP = (1/1.1) \times 2$ dentro de un año. Al número $(1/1.1)$ se lo denomina el factor de descuento. Esta denominación proviene del hecho que ese es el valor por el cual hay que multiplicar 2 dólares del próximo año para obtener su equivalente en dólares hoy; un factor es un número que multiplica a otro número. En este caso el factor de descuento es aproximadamente igual a 0.91. Ahora debería quedar claro de dónde viene la palabra "descuento": un dólar de mañana vale menos que un dólar de hoy (cuando la tasa de descuento es positiva). En concreto, para hallar el valor presente de dos pesos en un año, cuando la tasa de interés es del 10%, debo multiplicar los dos pesos del próximo año por el factor de descuento de un año para otro, que es 0.91. Esto nos da: $2 \times 0.91 = 1.82$. Es decir, dos pesos de mañana valen \$1.82 de hoy.

Valor neto. La otra palabra que nos interesa entender del VPN o VAN es la de palabra "Neto". Esto quiere decir que cuando queremos ver cuánto dinero vale el proyecto, tenemos que considerar tanto el dinero que entra como el dinero que sale, es decir, el neto. El dinero entra por motivos de ventas, y sale porque se incurren en gastos y se hacen inversiones. Una medida del monto neto de dinero que entró o salió en un año determinado es el denominado Flujo de Caja, cuya definición se presenta más abajo. Por eso, cuando se calcula el VPN o VAN, se utilizan los flujos de caja de cada período del proyecto.

Flujo de caja (FC). . El flujo de caja se calculó para cada uno de los 20 años de duración del proyecto de la siguiente manera:

$$FC_t = FCO_t - I_t - \Delta CTN_t \quad (1)$$

donde FC_t es el flujo de caja en el periodo t , FCO_t es el flujo de caja operativo en el periodo t , I_t es la inversión en el periodo t , y ΔCTN_t es el cambio en el capital de trabajo neto en el período t . El flujo de caja operativo se calculó, a su vez, utilizando la siguiente fórmula:

$$FCO_t = \text{Ingresos}_t - \text{Costos de producción}_t - \text{Gastos generales}_t - \text{Impuestos}$$

Valor Presente Neto (VPN). En el presente estudio, una vez obtenido el flujo de caja de cada uno los años de duración del proyecto, se procedió a descontarlos utilizando una tasa de interés anual apropiada. Finalmente, para obtener el valor presente neto se sumaron todos los flujos de caja descontados. En resumen, el VPN se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$VPN = \sum_{t=0}^{20} \frac{FC_t}{(1+r)^t} \quad (2)$$

donde t es un índice del tiempo, $t = 0, 1, 2, \dots, 20$, FC_t representa el flujo de caja del periodo t , y r es la tasa de descuento. Intuitivamente, el VPN indica el valor neto del proyecto en pesos de hoy día. Es decir, indica cuánto más ricos o pobres somos con el proyecto, en pesos de hoy. Representa el máximo monto que alguien debería estar dispuesto a pagar hoy por el proyecto. El criterio de inversión utilizando el VPN es el siguiente: Si el VPN es mayor que cero, se invierte (porque el proyecto nos hace más ricos) y si el VPN es menor que cero, no se invierte (porque el proyecto nos hace más pobres).

Tasa Interna de Retorno (TIR). Un segundo método que se utilizó para evaluar financieramente el proyecto es la Tasa Interna de Retorno (TIR). El concepto de la TIR, así como sus ventajas con respecto al VPN se presentarán más adelante. La Tasa Interna de Retorno (TIR)

es aquella tasa de descuento que hace que el VPN sea nulo. Es decir, es aquella tasa de descuento, tal que

$$VPN = \sum_{t=0}^{20} \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = 0. \quad (3)$$

La TIR se calculó utilizando el comando IRR (Internal Rate of Return) de Excel® usando como argumentos los flujos de caja de los veinte años del proyecto. En forma intuitiva, la TIR representa una especie de rentabilidad del proyecto. El criterio de inversión utilizando la TIR es el siguiente: Si la TIR es mayor que nuestra mejor alternativa de inversión de similar riesgo entonces invierto, y si la TIR es menor que nuestra mejor alternativa de inversión de similar riesgo entonces no invierto.

Comparando el VPN y la TIR como criterios de inversión. En general, el VPN es un mejor criterio de inversión que la TIR. Hay varios motivos por los cuales esto es así. Sin embargo, en el caso de la presente inversión, uno en particular destaca como el más importante: la TIR no proporciona tanta información como el VPN cuando los proyectos son excluyentes, es decir un proyecto no depende del otro proyecto para poder ejecutarse. En la presente tesis se está analizó si invertir en una planta de rayos gama o en una planta de rayos X es viable. Está claro que estas inversiones son excluyentes, o bien se invierte en la planta de rayos gamma o bien se invierte en la planta de rayos X, pero no en ambas. Cuando esto ocurre, el VPN es un mucho mejor criterio de inversión que la TIR. Esto se debe a que el cálculo de la TIR no utiliza la tasa de descuento. Incluso si uno de los proyectos, digamos el proyecto A, tiene una TIR mayor a la del otro proyecto, digamos el proyecto B, es imposible saber, basados solo en esta información, en cuál de los dos proyectos es mejor invertir. Es perfectamente posible, por ejemplo, que para

ciertas tasas de descuento el proyecto A tenga un mayor VPN que el proyecto B, mientras que para otras tasas de descuento, el proyecto B tenga un VPN mayor al proyecto A. En cambio, dada cualquier tasa de descuento, el VPN siempre indica de manera inequívoca en qué proyecto vale más la pena invertir.

Para calcular el (VPN) y (TIR), se desarrolló una tabla de Excel para calcular el Flujo de Caja (FC) del proyecto. Los ingresos, los costos de producción, las inversiones, los gastos generales, y el cambio en capital de trabajo neto, provinieron de las estimaciones realizadas en los objetivos específicos 1 y 2. Se asumió una depreciación lineal y total en los 10 primeros años. Según Dr. Edwin Irizarry Mora (comunicación personal en febrero del 2016), profesor de la Universidad Puerto Rico, la tasa impositiva puede variar entre un 25 % y 38 %, y la tasa de interés estuvo por debajo del 5%.

4.4 Metodología para estimar el impacto del riesgo

Análisis de Sensibilidad. Para estudiar el impacto de diferentes eventos sobre la bondad del proyecto se escogieron diferentes variables claves y se les hizo variar en valores pequeños para determinar qué tan sensible es el VPN y la TIR del proyecto ante cambios en los valores de dichas variables. También se calculó el punto de equilibrio de cada una de estas variables, definido como el valor de dicha variable para el cual el VPN se anula. Las variables claves para las cuales se realizó un análisis de sensibilidad y de punto de equilibrio fueron: el monto de la inversión, los costos de operación, la demanda, y el precio del servicio de irradiación. En cada uno de estos casos se utilizó como punto de partida el modelo de Excel desarrollado para calcular el VPN y la TIR (ver métodos y procedimientos para el Objetivo Específico 3).

Punto de Equilibrio. Para realizar el análisis del punto de equilibrio se utilizó el concepto del valor presente neto. En concreto, se entendió por punto de equilibrio de la variable X, denominado X^* , aquel valor de la variable X para la cual el valor presente se anuló. En otras palabras, si el VPN es una función de la variable X se puede escribir $VPN(X)$. Usando esta nomenclatura, el punto de equilibrio de la variable X, es aquel valor X^* tal que $VPN(X^*) = 0$. Definido así el punto de equilibrio, se puede ver que la TIR es un punto de equilibrio; el punto de equilibrio de la variable “tasa de descuento”. Se calcularon los puntos de equilibrio de las variables que resultaron ser más influyentes cuando se hizo el análisis de sensibilidad. Para calcular los puntos de equilibrio se hizo uso de la función de Excel conocida como “Goal Seek...”

Análisis de Monte Carlo. Para estudiar el impacto de la incertidumbre sobre la bondad del proyecto se utilizó el Método de Monte Carlo. Para dicho fin se definieron distribuciones probabilísticas normales o triangulares para cada una de las siguientes variables: inversión, costos de operación, y demanda. Luego se obtuvieron datos aleatorios de cada una de estas distribuciones probabilísticas y se los alimentó al modelo del valor presente neto desarrollado para el objetivo 3 y se calculó el valor presente neto. Se repitió este procedimiento 10,000 veces; o sea, obteniendo los valores 10,000 veces los resultados de las ecuaciones 1, 2 y 3. La distribución muestral del valor presente neto así calculado se tabuló en una tabla de frecuencias del valor presente neto. Dichos valores se ilustran en una gráfica de frecuencias relativas, Estos sirven como los estimados de las probabilidades de ocurrencia de cada tramo de valores del valor presente neto. A partir de dichas probabilidades estimadas se calculó el valor presente neto estimado y la probabilidad de que el valor presente neto sea negativa (o positiva). A partir de esta gráfica de frecuencias relativas también se calculó el valor presente esperado y la desviación

estándar del valor presente esperado. Para llevar a cabo el análisis de Monte Carlo se utilizó el programa @Risk de Excel.

4.5 Metodología para estimar el valor de la flexibilidad

La flexibilidad es valiosa cuando hay incertidumbre. Por ejemplo, supongamos que queremos comprar una docena de naranjas pero tenemos incertidumbre sobre si son dulces o no. Ahora supongamos que hay varios vendedores de naranjas: “X” ofrece la opción a probar la fruta antes de decidir comprarla, mientras que “Y” dice que si quieren probar la fruta la tienen que comprar primero. ¿Qué fruta tiene mayor valor en los ojos del comprador? Claramente la fruta de “X” porque si el consumidor prueba y no le gusta no tiene porqué comprar la fruta, pero si prueba y le gusta se puede beneficiar de comprar toda la fruta que quiera. “X” ofrece una transacción bastante flexible. En cambio, el consumidor que decida comprar la fruta de “Y” tiene que quedarse con la fruta le guste o no. “Y” ofrece una transacción poco flexible. Supongamos que hay un tercer vendedor, digamos que se llama “Z”, que vende la fruta y proporciona la opción a devolverla si al consumidor no le gusta. Este es otro tipo de flexibilidad. A las opciones que existen sobre activos reales, como son las naranjas, se las denomina opciones reales (para diferenciarlas de las opciones financieras que son opciones sobre activos financieros). Al proceso de calcular el valor de dichas opciones se le denomina valoración de opciones reales.

Los proyectos, al igual que las naranjas, son activos reales. Y cuando uno invierte en un proyecto, uno puede pensar que está comprando un activo real, de manera análoga a cuando uno compra una naranja. Algunos proyectos son inflexibles. No ofrecen ninguna opción. Otros proyecto son más flexibles; incorporan opciones. Por ejemplo, muchos proyectos incorporan la opción a postergar el inicio del proyecto. Otros incluyen la opción a cerrar el proyecto. Otros

incluyen la opción a ampliar el proyecto. Existen muchas otras opciones que pueden o no estar incorporadas en los proyectos. De hecho, algunos proyectos pueden tener incorporadas varias opciones simultáneamente. Obviamente, al igual que cuando uno compra las naranjas de “X” si son ricas, o devuelve las de “Z” si son malas, uno puede ejercer las opciones a cerrar, esperar, o ampliar, entre otras opciones, cuando las condiciones así lo ameriten.

Volviendo al caso de las plantas de irradiación, en Puerto Rico se desconoce cuál va a ser el volumen del producto a irradiarse. Es decir, existe mucha incertidumbre sobre el tamaño de la demanda. Uno podría buscar un proyecto que permita esperar un año (o más), hasta que la demanda se revele y permita tomar una decisión más informada. Esa sería una opción a postergar el proyecto. Otro proyecto podría ser diseñado de manera modular, de manera que uno empieza pequeño, tantea el tamaño de la demanda, y si esta se revela como lo suficientemente grande, amplía un módulo más del proyecto; pero si la demanda no resulta ser lo suficientemente grande, se decide no construir el siguiente módulo. Esa sería una opción a ampliar. Cada una de estas opciones se puede valorar con el método de valoración de opciones reales. En el presente trabajo se calculó únicamente la opción de diferir el proyecto un año.

La metodología para valorar opciones reales es muy reciente. Los economistas que sentaron las bases para el desarrollo de esta metodología ganaron el Premio Nobel de Economía. El motivo por el cual la valoración de opciones reales se evadió por tanto tiempo de un análisis riguroso es porque el problema es bastante complicado. Implica la toma de decisiones en cada momento del tiempo, tomando en cuenta variables aleatorias cuyas distribuciones están cambiando constantemente en el tiempo. Gran parte de la complejidad del problema se obvia haciendo uso de un argumento muy ingenioso que tiene dos partes. La primera parte consiste en usar una combinación o canasta de activos fáciles de valorar para replicar los réditos de una

opción. La segunda parte hace uso de lo que se denomina "la ley de un solo precio", que indica que si dos activos tienen los mismos réditos, deben tener el mismo valor. En resumen, la estrategia consiste en estimar la canasta compuesta por activos fáciles de valorar y, como esta canasta tiene los mismos réditos que los de la opción, su valor sirve de estimado para el valor de la opción.

En todo caso, el valor de un proyecto puede considerarse como la suma de dos valores: el valor del proyecto sin flexibilidad y el valor de la opción (o flexibilidad). El valor del proyecto sin flexibilidad es el Valor Presente Neto (VPN) que se explicó más arriba. El valor de la opción es el que se explicará en la siguiente sección. A este nuevo valor del proyecto que incluye el valor de la opción se le denomina Valor Presente Neto Extendido (VPNE):

$$\text{VPNE} = \text{VPN} + \text{Valor de la opción} \quad (4)$$

4.5.1 Valoración de opciones mediante el método binomial

En el presente trabajo se utilizó una versión simplificada del modelo originalmente propuesto por Merton (1973) para valorar opciones. Esta versión simplificada se conoce como el modelo binomial de valoración de opciones. Por ejemplo, se asume que el tiempo es discreto. Por otro lado, dado el valor del proyecto en el período t , V_t , solo dos cosas pueden pasar al valor del proyecto en el períodos $t+1$: (i) o bien sube a $V_{t+1} = u V_t$, o bien baja a $V_{t+1} = d V_t$. Obviamente, para que el valor de V suba, i.e., para que $V_{t+1} > V_t$, debe ser cierto que $u > 1$. De manera análoga, para que el valor de V baje, i.e., para que $V_{t+1} < V_t$, debe ser cierto que $d < 1$, o sea una probabilidad $1 - p$ que el valor baje. El cambio podría haber sido aditivo, pero aquí se asume multiplicativo. Generalmente se define $d = 1/u$, de manera que $Vud = Vdu$; es decir, si se parte de un valor V y primero el valor sube y luego baja, se llega al mismo valor que si se parte

de V y primero baja y luego sube. Este supuesto no es estrictamente necesario, pero facilita los cálculos.

Para que esto quede claro, digamos que tenemos dos intervalos de tiempo, i.e. $T = 2$. Hoy día es el período $t = 0$ y el valor del activo es de V . En el próximo período el valor puede subir a V_u , o bajar a V_d . Si el valor sube en el primer intervalo de tiempo, en el segundo intervalo de tiempo puede volver a subir o bajar, en cuyo caso los valores en $t = 2$ serían de V_{uu} y V_{ud} , respectivamente. Si el valor baja en el primer intervalo de tiempo, en el segundo intervalo de tiempo puede subir o volver a bajar, en cuyo caso los valores en $t = 2$ serían V_{du} y V_{dd} , respectivamente. Obviamente, debido a la manera como se definieron u y d , $V_{du} = V_{ud}$, tal como se mencionó en el anterior párrafo. En cada momento del tiempo y en cada valor con el que se parta, se asume una probabilidad p de que en el próximo período el valor suba, y una probabilidad $1-p$ de que en el próximo período el valor baje. Este proceso se esquematiza en la Figura 4.1 por medio de un árbol de nodos, malla o látice binomial:

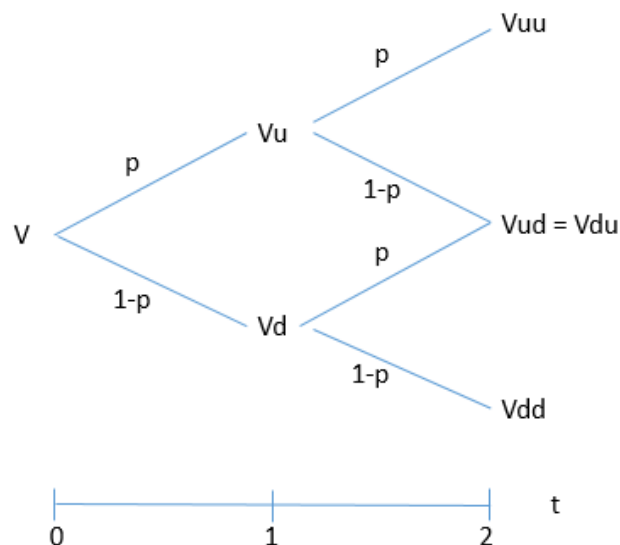


Figura 4.1 Ládice o malla binomial

Látice binomial para dos intervalos de tiempo, empezando con un valor V del activo. En cada nodo, hay una probabilidad p de que el valor suba a u veces el valor actual, y una probabilidad $1-p$ de que el valor baje a d veces el valor actual.

Cuando el número de intervalos de tiempo, que se denota T , tiende a infinito, el límite de u^T es infinito, mientras que el límite de d^T cuando T tiende a infinito es cero. En primera instancia este parece un modelo demasiado simplista porque en cada período de tiempo solo permite que pasen dos cosas: o bien baja el valor del proyecto, o bien sube. Sin embargo, cuando el número de intervalos de tiempo aumenta, la distribución binomial tiende a la distribución lognormal, que es la más común para variables cuyos valores no pueden ser negativos (si d y u fueran cambios aditivos, entonces la distribución binomial converge a la distribución normal cuando T tiende al infinito). Por lo tanto, en este sentido, la distribución que se obtiene con este

modelo binomial puede ser tan parecida a la lognormal como se necesite; solo se tiene que aumentar el número de intervalos de tiempo T .

En el marco de este modelo binomial se procede a construir un modelo de valoración de opciones. Supongamos que el precio de ejercer la opción es de I . Este precio, es necesario aclarar, no es el precio de la opción, sino el precio al cual la opción me da derecho a vender o comprar el activo (dependiendo de si se trata de una opción de venta o compra, respectivamente). ¿Cuáles serán los réditos de la opción? Eso va a depender del valor que tenga el activo (el proyecto) en el próximo período. Si el valor del proyecto sube a V_u y ese monto es mayor que I (es decir, si $V_u - I > 0$), entonces vale la pena ejercer la opción y obtener réditos de $V_u - I$. Si por otro lado, el valor del proyecto en el próximo período (V_u) es menor que el precio I de ejercer la opción, no tiene sentido ejercer la opción. No conviene pagar un monto I por algo que vale menos que I . En ese caso, como no se ejerce la opción el rédito es de 0. Por eso, el rédito será o bien $V_u - I$, o bien 0, dependiendo cuál sea más alto. De manera más sucinta, el rédito en caso de que el valor del proyecto suba (E_u) se puede expresar de la siguiente manera:

$$E_u = \max (V_u - I, 0) \quad (5)$$

Donde *max* indica que se debe escoger entre el máximo de los dos números que aparecen dentro del paréntesis: $V_u - I$ y 0. De manera análoga, el rédito en caso de que el valor del proyecto baje (E_d) se puede expresar de la siguiente manera:

$$E_d = \max (V_d - I, 0). \quad (6)$$

4.5.2 Opciones reales y evaluación en proyectos de inversión

El cálculo del valor de las opciones reales de un proyecto comienza básicamente con el cálculo del valor del activo subyacente mediante el método de FDC (flujo de caja descontado)

utilizando una tasa de descuento ajustada al riesgo. A continuación incorpora el costo de inversión (precio de ejercicio, como se menciona en valoración de opciones financieras) y el valor creado por la incertidumbre del valor del activo o del proyecto (volatilidad de los FDC como la desviación estándar en la vida del proyecto, este dato se obtiene de la simulación Monte Carlo) y la flexibilidad debido a la decisión contingente. Si no hay incertidumbre, la gerencia puede tomar una decisión hoy y no hay valor de la opción. La incertidumbre crea futuras oportunidades de decisión de gestión que se reflejan en el valor de la opción. Cuanto mayor sea la incertidumbre, mayor será el valor de la opción, en otras palabras, cuanto mayor sea la volatilidad de los FDC o mayor sea su desviación estándar, mayor será el valor de las opciones.

La metodología básica del enfoque de probabilidades de riesgo neutro consiste en ajustar el riesgo de los flujos de efectivos a través de la red con probabilidades de riesgo neutro (o sea que el inversionista está seguro que la tasa de descuento o rendimiento no va estar por debajo de la tasa de inversiones en el mercado financiero, es decir, es un riesgo neutro) y descontarlo a la tasa libre de riesgo (bono del tesoro de Estados Unidos a 1.2 % anual). Independientemente de la opción a valorar, la red binomial que representa el valor del activo subyacente (FDC de ambos proyectos) tiene las mismas propiedades y puede describirse mediante las ecuaciones que se presentan a continuación (Kodukula y Papudesu, 2006)

$$E = \frac{pEu + (1-p)Ed}{r} \quad (7)$$

E = valor neto extendido del proyecto incluyendo el valor de la opción

FCD

FCD = flujo de caja descontado

$$p = \frac{r-d}{u-d} \quad (8)$$

p = probabilidad neutral al riesgo

r_f = 1 + tasa libre de riesgo (bono del tesoro Estados Unidos 1.2 %)

u = 1 + el % de cambio en el valor total entre períodos, si se dan las consideraciones optimistas

d = 1 + el % de cambio en el valor total del proyecto, si se dan las consideraciones pesimistas.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados de la estimación de la inversión y los costos operativos

Las siguientes fuentes se consultaron para obtener datos de inversiones y costos. El costo de las 5 hectáreas de tierra que se estimó necesarias para el proyecto se valoraron en \$150,000 (comunicación personal, en julio del 2015, con el profesor Víctor Meza, tasador de fincas agrícolas). Los costos de irradiar con rayos X se obtuvieron en una comunicación personal con el Dr. Suresh Pillai, Director Nacional de Centro de Investigación para Electro Beam y profesor de la Universidad de Texas A&M (marzo del 2016). Los costos de equipos para la planta con cobalto 60 se obtuvieron en una comunicación personal con Terry Kehoe, gerente de ventas y mercadeo de Nordion Inc., Canadá (mayo del 2016).

5.1.1 Planta cobalto 60

La inversión en equipo y en capital de trabajo neto, respectivamente, es de \$4,091,555 y \$150,000 de acuerdo al desglose de la Tabla 5.1. Los costos anuales directos e indirectos son de \$791,360 y \$277,795 de acuerdo al desglose de la Tabla 5.2 y la Tabla 5.3 respectivamente.

Tabla 5.1 Inversión planta cobalto 60

Equipo	Costo (\$)
Irradiador	1,500,000
Fuente de cobalto (\$5/Ci)	256,555
Tote boxes (100 unidades a \$550 c/u)	55,000
Equipo auxiliar (monta carga y otros), incluye contenedor de cobalto 60	200,000
Transportador automático (400 ft a \$700/ft)	300,000
Instalaciones	80,000
Laboratorio y oficinas	100,000
Muro protector	1,200,000
Terreno	150,000
Ingeniería	250,000
Total inversion	4,091,555
Capital de trabajo neto (*)	150,000

Fuente: Kehoe (comunicación personal del 26 de mayo del 2016) de Nordion Inc. Canadá, Molins (2001) y Morrison (1989).

(*) Este dato se obtuvo a partir de un estimado que aparece en Morrison (1989), aumentado en un 40% para considerar la inflación.

Tabla 5.2 Costos directos anuales planta cobalto 60

Costos directos	Costo (\$)
Mantenimiento y reparaciones	60,000
Utilidades y comunicación	70,000
Suministros operativos	70,000
Operadores (4 personas a \$29/h)	222,720
Manipuladores productos (16 personas a \$15/h)	368,640
Total costos directos	791,360
Costos directos unitarios (\$/kg)*	0.02

Fuente: Kehoe (comunicación personal del 26 de mayo del 2016) de Nordion Inc. Canadá, Molins (2001) y Morrison (1989).

(*) Se asume un volumen irradiado de 40 mil toneladas métricas, que es lo máximo que puede procesar esta planta si trabaja 6 mil horas al año (Molins, 2001).

Tabla 5.3 Costos indirectos anuales planta cobalto 60

Costos indirectos	Costo (\$)
Administración	60,000
Reemplazo cobalto 6311 Ci (\$5/Ci)	31,555
Oficial de seguridad (\$30/h)	57,600
Gerente planta (\$67/h)	128,640
Sub-total costos indirectos	277,795

Fuente: Kehoe (comunicación personal del 26 de mayo del 2016) de Nordion Inc. Canadá, Molins (2001) y Morrison (1989).

5.1.2 Planta rayos X

La inversión en equipo y en capital de trabajo neto, respectivamente, es de \$7, 231,000 y \$160,000 de acuerdo al desglose de la Tabla 5.4. Los costos anuales directos e indirectos son de \$1, 295,360 y \$246,240 de acuerdo al desglose de la Tabla 5.5 y Tabla 5.6 respectivamente.

Tabla 5.4 Inversión planta rayos X

Equipo	Costo (\$)
Acelerador (150 kW)	2,176,000
Instalación	435,000
Equipo auxiliar (monta cargas y otros)	250,000
Instalaciones, construcción, terrenos, oficina y laboratorio	2,800,000
Muro protector	1,200,000
Ingeniería	370,000
Total inversion	7,231,000
Capital de trabajo neto (*)	160,000

Fuente: Miller (2005), Morrison (1989) y Pillai (2016).

(*) Este dato se obtuvo a partir de un estimado que aparece en Morrison (1989), aumentado en un 40% para considerar la inflación.

Tabla 5.5 Costos directos anuales para planta rayos X.

Costos directos	Costo (\$)
Mantenimiento y reparaciones	60,000
Utilidades y comunicación	70,000
Electricidad	504,000
Suministros operativos	70,000
Operadores (4 personas a \$29/h)	222,720
Manipuladores productos (16 personas a \$15/h)	368,640
Total costos directos	1,295,360
Costos directos unitarios (\$/kg) (*)	0.032

Fuente: Miller (2005), Morrison (1989) y Pillai (2016).

(*) Se asume un volumen irradiado de 40 mil toneladas métricas, que es lo máximo que puede procesar esta planta si trabaja 6 mil horas al año (Molins, 2001).

Tabla 5.6 Costos indirectos anuales planta rayos X

Costos indirectos	Costo (\$)
Administración	60,000
Oficial de seguridad (\$30/h)	57,600
Gerente planta (\$67/h)	128,640
Sub-total costos indirectos	246,240

Fuente: Miller (2005), Morrison (1989) y Pillai (2016).

Costo de la electricidad. El costo de la electricidad es un factor importante a considerar en lugares como Hawaii y Puerto Rico, donde este insumo es extremadamente caro. En la Tabla 5.7 se desglosa el costo de la electricidad para Puerto Rico.

Tabla 5.7 Costos de electricidad para Puerto Rico para planta rayos X

Costo de la electricidad total	Item
Factor consume	8
Precio \$/kwh	0.21
Equipo acelerador lineal kW	150
Horas	2000
$C = \text{factor consumo} \times \text{cap kW} \times \text{precio} \times \text{horas}$	\$504,000

Fuente: Basado en fórmulas proporcionadas por Miller (2005), y complementadas con datos de Puerto Rico.

5.2 Resultados de la estimación de la demanda

Como resultado de entrevistas realizadas a especialistas, se obtuvieron los siguientes datos sobre algunos productos representativos dentro de las categorías de frutales tradicionales, frutales no tradicionales, y granos básicos con algún potencial de demanda de servicios de irradiación:

- (i) **Mangó y otros frutales tradicionales.** El gorgojo de la semilla del mangó (*Sternochetus mangiferae*) es una plaga que está invadiendo poco a poco a países productores de mangó en el Caribe. Como este insecto se aloja en la semilla del mangó, es difícil controlarlo con los métodos típicos de control de insectos como lo es baño de agua caliente que se usa para controlar la mosca de la fruta. Si el gorgojo de la semilla llegara a entrar a Puerto Rico, entonces empresas que actualmente exportan mangó verían sus exportaciones perjudicadas. Por ejemplo, la finca de Martex tiene actualmente unas de 2,400 cuerdas destinadas a la producción de mangó para exportación, entre otros frutales, y ha adquirido 2,000 cuerdas adicionales. Según el Dr. Yair Aron, vicepresidente y jefe de investigaciones agrícolas de Martex, cada cuerda tiene 75 árboles de mango y cada árbol produce 300 libras de mango. Por lo

tanto, la productividad por hectárea es de 22,500 libras. Es el área cultivada con mangó por Martex se estima en 3,000 cuerdas, eso nos da una producción anual de 30,681 TM de mangó. Esta estimación no toma en cuenta las otras dos fincas que exportan mangos en el sur de Ponce. Aún más, si consideramos las exportaciones potenciales de otros frutales tradicionales, la demanda potencial de servicios de irradiación podría ser mayor. Por ejemplo, según el Dr. José Pablo Morales (comunicación personal, 2010), Puerto Rico tiene la capacidad de incrementar a 5 veces el valor actual de su producción de frutales.

- (ii) **Frutales no tradicionales.** Productores de cultivos nuevos altamente rentables, como puede ser el achachairú o *Garcinia mangostana*, pueden constituirse en importantes demandantes de servicios de irradiación. Por ejemplo, con un programa adecuado de fomento a la producción de achachairú, la superficie cultivada con este frutal exótico se podría expandir hasta llegar a las 1,000 hectáreas, que equivale a unas 10,000 TM anuales de producto, sin que caiga su precio por debajo del costo de producción (comunicación personal de diciembre del 2015 con el Dr. Barragán).
- (iii) **Granos básicos.** Uno de los usos de la tecnología de irradiación es la de mejorar y mantener las condiciones sanitarias y aumentar el tiempo que se pueden almacenar productos alimenticios como son los granos básicos. Según la Dra. Myrna Comas (comunicación personal de septiembre del 2013), Secretaria del Departamento de Agricultura de Puerto Rico, las empresas que almacenan granos están decididas a trabajar con la sustitución de importaciones y no descartan que se comiencen a producir habichuelas y arroz, entre otros granos básicos. Esto con el objetivo de suplir mercados institucionales como son los comedores escolares y el Departamento de

Corrección. Estos esfuerzos podrían llegar a sustituir la importación anual de 54,000 TM habichuela blanca (usando 166 cuerdas de terreno) y 5,000 TM de arroz (en 2,000 cuerdas). Solamente en estos dos rubros se estima una producción anual local de granos básicos de 60,000 TM. Si se irradiara la totalidad de los granos básicos consumidos en Puerto Rico, entonces habría que tomar en cuenta, por ejemplo, los 3 millones de quintales de arroz que importó Puerto Rico en promedio durante los últimos 20 años.

Si nos centramos solamente en los cultivos frutales tradicionales más importantes de Puerto Rico (ver Tabla 5.8) se puede observar que la producción anual en el período desde el 2004 al 2011 fluctúa entre las 50,000 y 130,000 TM. La producción promedio anual de estos frutales durante el mismo período fue casi 100,000 TM. La mayor parte de esta fruta se destina al mercado interno.

Tabla 5.8 Producción de algunas frutas importantes de Puerto Rico

Producción (TM)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Aguacate	1,535	1,710	1,965	1,882	1,377	1,374	1,219	1,208
Chinas	73,104	77,588	101,092	92,782	80,082	92,782	43,532	38,688
Mangó	15,857	15,073	17,500	14,389	12,465	11,862	9,383	7,596
Melones	231	127	178	138	137	117	172	95
Piña	16,850	16,850	7,562	2,390	1,525	1,572	4,200	2,303
Papaya	784	983	1,335	1,369	1,445	1,056	887	492
Total	108,361	112,381	129,632	112,950	97,031	108,763	59,393	50,382

Fuente: Departamento de Agricultura de PR (2014).

Del análisis anterior se puede deducir que existe bastante producción en Puerto Rico que potencialmente podría ser irradiada. También existen varios proyectos prometedores que podrían potencialmente demandar servicios de irradiación. Sin embargo, es muy difícil proyectar qué porcentaje de esta demanda potencial se puede convertir con el pasar del tiempo en una demanda efectiva por servicios de irradiación. Por lo tanto, para fines del presente estudio se tomó una posición conservadora. Se asumió que el único cultivo que demandaría los servicios de irradiación es el mangó de exportación. Considerando sol el caso de Martex Farms, se vió más arriba que es razonable atribuirles en el futuro cercano una producción anual de 30,000 TM. Dada la inminente llegada del gorgojo de la semilla del mangó a Puerto Rico, se asumió que Martex Farms empezaría a demandar servicios de irradiación para poder mantener su llegada a

mercados internacionales. Asumimos, en concreto, que la demanda de Martex Farms por servicios de irradiación sería de un 50% de su producción anual proyectada. Es decir, en el presente estudio se asumió una demanda anual de 15,000 TM. Para los análisis de sensibilidad se asumieron valores que fluctúan entre un mínimo de 10,000 TM y un máximo 40,000 TM.

5.3 Resultados de la evaluación financiera del proyecto

La Tabla 5.9 y la Tabla 5.10 contienen el cálculo del flujo de caja, VPN y TIR de los proyectos de cobalto 60 y rayos X, respectivamente.

Tabla 5.9 Flujo de caja, VPN y TIR de planta de cobalto 60

Modelo flujo de caja																					
Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos por venta		1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000
Costos directos		300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000
Costos indirectos		277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795	277,795
Depreciación		409,156	409,156	409,156	409,156	409,156	409155.5	409,156	409,156	409,156	409,156	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EBIT		513,050	513,050	513,050	513,050	513,050	513,050	513,050	513,050	513,050	513,050	922,205	922,205	922,205	922,205	922,205	922,205	922,205	922,205	922,205	922,205
Impuestos	0	153,915	153,915	153,915	153,915	153,915	153,915	153,915	153,915	153,915	153,915	276,662	276,662	276,662	276,662	276,662	276,662	276,662	276,662	276,662	276,662
Flujo de caja operativo	0	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	645,544	645,544	645,544	645,544	645,544	645,544	645,544	645,544	645,544	645,544
Inversión	4,091,555																				
Cambio en CTN	150,000																				-150000
Flujo de caja	- 4,241,555	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	768,290	645,544	645,544	645,544	645,544	645,544	645,544	645,544	645,544	645,544	795,544
Flujo caja descontado	- 4,241,555	731,705	696,862	663,678	632,074	601,975	573,310	546,009	520,009	495,247	471,664	377,436	359,463	342,346	326,043	310,517	295,731	281,648	268,237	255,463	299,832
VPN	4,807,694																				
TIR	17%																				

Tabla 5.10 Flujo de caja, VPN y TIR de planta de rayos X

Modelo flujo de caja																					
Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos por venta		1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000	1,500,000
Costos directos		480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000	480,000
Costos indirectos		246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240	246,240
Depreciacion		723,100	723,100	723,100	723,100	723,100	723,100	723,100	723,100	723,100	723,100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EBIT		50,660	50,660	50,660	50,660	50,660	50,660	50,660	50,660	50,660	50,660	773,760	773,760	773,760	773,760	773,760	773,760	773,760	773,760	773,760	773,760
Impuestos	0	15,198	15,198	15,198	15,198	15,198	15,198	15,198	15,198	15,198	15,198	232,128	232,128	232,128	232,128	232,128	232,128	232,128	232,128	232,128	232,128
Flujo de caja operativo	0	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	541,632	541,632	541,632	541,632	541,632	541,632	541,632	541,632	541,632	541,632
Inversión	7,231,000																				
Cambio en CTN	160,000																				- 160,000
Flujo de caja	- 7,391,000	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	758,562	541,632	541,632	541,632	541,632	541,632	541,632	541,632	541,632	541,632	701,632
Flujo caja descontado	- 7,391,000	722,440	688,038	655,274	624,071	594,353	566,051	539,096	513,425	488,976	465,691	316,681	301,601	287,239	273,561	260,534	248,128	236,312	225,059	214,342	264,438
VPN	1,094,310																				
TIR	7%																				

En la Tabla 5.11 se resumen los resultados financieros para cada uno de los proyectos. Asumiendo una tasa de descuento del 5%, un volumen irradiado de 15 TM, y un precio de irradiación de \$0.10/kg, el VPN de la planta de cobalto 60 y rayos X, respectivamente, es de \$4,807,694 y \$1,094,310. La TIR de la planta de cobalto 60 y rayos X, respectivamente, es de 17% y 7%. Ambos proyectos son rentables, pero la planta de cobalto 60 es más atractiva que la de rayos X. En concreto, la planta de cobalto 60 es casi 4 millones de dólares más valiosa que la de rayos X.

Tabla 5.11 Resultados de evaluación financiera cobalto 60 y rayos X

Variable	Cobalto 60	Rayos X
VPN	\$4,807,694	\$1,094,310
TIR	17%	7%
Precio (\$/kg)	0.10	0.10
Cantidad (TM)	15,000	15,000

5.4 Resultados de la estimación del impacto del riesgo

Análisis de sensibilidad

5.4.1 Planta cobalto 60

En la Tabla 5.12 y 5.13 se establece el modelo de entrada de variables al sistema financiero (VPN) , por ejemplo: precio, cantidad, costos, y tasa de descuento; tomando en cuenta los valores máximo y mínimo, identificando las salidas al sistema y su cambio en porcentaje, por ejemplo, si ponemos un valor de precio (entrada al sistema) de \$0.12 vamos a obtener un valor de 7 M (salida del sistema) en VPN tomando en cuenta como valor máximo y valor mínimo de 2 M con un precio de \$ 0.08 generando cambios de 54%.

El VPN de la planta de cobalto 60 es más sensible a cambios en el precio de irradiación y a la cantidad irradiada (ver Tabla 5.12). En concreto, un cambio del 20% (la elección de este porcentaje es de manera aleatoria) en el precio de irradiación genera cambios de un 54% en el VPN de la planta de cobalto 60. Por su parte, un cambio del 20% en la cantidad irradiada genera cambios de un 44% en el VPN de la planta de cobalto 60.

Estos resultados son bastante robustos a la magnitud del cambio que se asuma en cada variable. Por ejemplo ante un cambio del precio de irradiación del 20% se obtuvo un cambio en el VPN de alrededor del 54%. Es decir, si dividimos el cambio porcentual en el VPN ($\Delta\%VPN$) por el cambio porcentual en el precio de irradiación ($\Delta\%Precio$), obtenemos una medida del porcentaje promedio en donde el VPN cambia por cada punto porcentual de cambio en el precio de irradiación: $\Delta\%VPN/\Delta\%Precio = 54\%/20\% = 2.7$. Por otro lado, si se realiza otro ejercicio de sensibilidad cambiando el precio de la irradiación en un 1%, se obtiene un valor exacto (no promedio) del porcentaje en el que el VPN cambia cuando se cambia el precio de irradiación en

un punto porcentual, igual a $\Delta\%VPN/\Delta\%Precio = 2.72\%$. El hecho de que ambos números hayan resultado similares se debe a que la relación entre estas variables es bastante lineal. Lo propio ocurre con los cambios en la cantidad irradiada. Se obtienen resultados por punto porcentual de cambios en las variables, como precio de irradiación, cantidad irradiada, tasa de descuento, inversión, costos directos, similares ya sea que se realicen cambios del 20% o del 1%.

Tabla 5.12 Resumen análisis de sensibilidad (VPN) planta cobalto 60

Nombre de entrada	Mínimo			Máximo			Valor base
	Salida		Entrada	Salida		Entrada	
	Valor (1,000)	Cambio (%)	Valor	Valor (1,000)	Cambio (%)	Valor	
Precio de irradiación (\$/kg)	2,191	54%	0.08	7,425	54%	0.12	0.1
Cantidad irradiada (kg/año)	2,714	-44%	12,000,000	6,901	44%	18,000,000	15,000,000
Tasa descuento	4,113	-14%	0.06	5,596	16%	0.04	0.05
Inversión	4,179	-13%	4,909,866	5,436	13%	3,273,244	4,091,555
Costos directos (\$/kg)	4,284	-11%	0.024	5,331	11%	0.016	0.020
Tasa impositiva	4,308	-10%	0.36	5,308	10%	0.24	0.3
Costos indirectos (\$/año)	4,323	-10%	333,354	5,292	10%	222,236	277,795

5.4.2 Planta rayos X

El VPN de la planta de rayos X es más sensible a cambios en el precio de irradiación, a la cantidad irradiada, y a la inversión (ver Tabla 5.13). En concreto, un cambio del 20% (la elección de este porcentaje es de manera aleatoria) en el precio de irradiación genera cambios de un 290% en el VPN de la planta de rayos X. Por su parte, un cambio del 20% en la cantidad irradiada genera cambios de un 175% en el VPN de la

planta de rayos X. Finalmente, un cambio del 20% en la inversión genera cambios de un 110% en el VPN de la planta de rayos X.

Tabla 5.13 Resumen análisis de sensibilidad (VPN) planta rayos X

	Mínimo			Máximo			
	Salida		Entrada	Salida		Entrada	Entrada
Nombre de entrada	Valor (1000)	Cambio (%)	Valor	Valor	Cambio (%)	Valor	Valor base
Precio de irradiación (\$/kg)	- 2.100	-292%	0.08	3,711,374	239%	0.12	0.1
Cantidad irradiada (kg/año)	- 1,040	-195%	12,000,000	2,873,914	163%	18,000,000	15,000,000
Inversión	- 234	-121%	8,677,200	2,205,495	102%	5,784,800	7,231,000
Costos directos (\$/kg)	151	-86%	0.038	1,931,771	77%	0.026	0.032
Tasa descuento	467	-57%	0.06	1,802,474	65%	0.04	0.05
Costos indirectos (\$/año)	664	-39%	295,488	1,523,927	39%	196,992	246,240
Tasa impositiva	850	-22%	0.36	1,337,861	22%	0.24	0.3

5.4.3 Punto de equilibrio

El estudio de sensibilidad nos indica que las dos variables que más influyen sobre el VPN son el precio de irradiación y la cantidad irradiada, en ese orden de importancia. Por lo tanto, se procedió a calcular los puntos de equilibrio de estas dos variables. Como el punto de equilibrio del precio de irradiación está calculado en base a la noción de valores presente neto, se consideran todos los costos, incluyendo las inversiones y el valor del dinero en el tiempo. Por lo tanto, el punto de equilibrio del precio se puede interpretar como el mínimo precio que hace apenas rentable al proyecto. En otras palabras, este precio de equilibrio se puede interpretar como el costo de producción de la irradiación. En este caso, vemos de la Tabla 5.14 que el costo de producción de cada kg irradiado en la planta de cobalto 60 es de \$0.064 mientras que en la de rayos X es de \$0.093; es decir, el costo de irradiación en la planta de rayos X es casi un 50%

superior al costo de producción de la planta de cobalto 60. Por su parte, se requieren apenas 8.2 TM de producto irradiado para que la planta de cobalto 60 empiece a ser rentable, mientras que la planta de rayos X requiere de 13.4 TM para empezar a ser rentable.

Tabla 5.14 Puntos de equilibrio del precio y la cantidad irradiada

Puntos de equilibrio	Cobalto 60	Rayos X
Precio de irradiación (o costo de producción)	\$0.064/kg	\$0.093/kg
Cantidad irradiada	8.2 TM	13.4 TM

5.4.4 Análisis de Monte Carlo

5.4.5 Planta cobalto 60

Entre las variables que se asumieron aleatorias en el análisis de Monte Carlo se encuentran el precio de irradiación, la cantidad irradiada, los costos directos y la inversión. Para el precio y los costos se utilizó una distribución normal con medias de \$0.1/kg y 0.02 \$/kg, respectivamente, y desviaciones estándar de \$0.01/kg y \$0.002/kg, respectivamente. Para la cantidad irradiada y la inversión se asumieron distribuciones triangulares con moda de 15,000 TM y \$4, 091,555 respectivamente, valores mínimos de 10,000 TM y \$4.0 M, respectivamente, y valores máximos de 40,000 TM y \$5.0 M, respectivamente. Los resultados de la simulación de Monte Carlo con 10,000 repeticiones se presentan en la Figura 5.1, donde se observa que la probabilidad de obtener un VPN negativo es del 0.2% (es decir que la probabilidad de obtener un VPN positivo es de 99.8%), el VPN esperado es de \$9, 244,223 con una desviación estándar de \$4, 976,437.

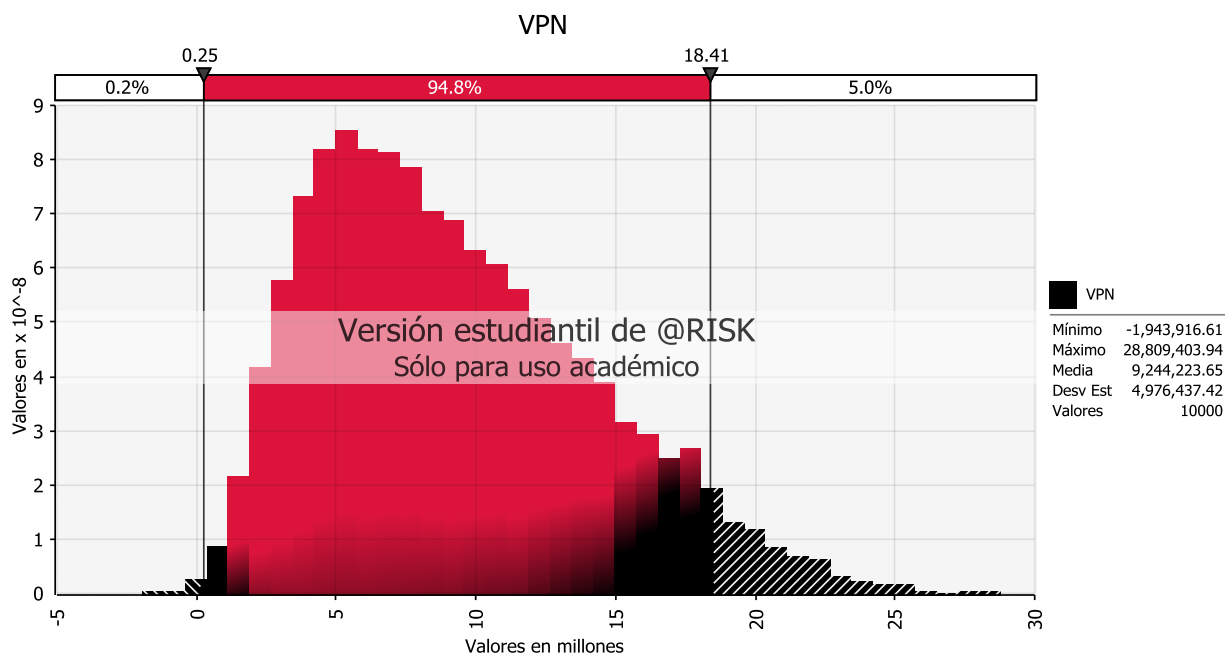


Figura 5.1 Distribución del VPN para la planta de cobalto 60

5.4.6 Planta rayos X

Entre las variables que se asumieron aleatorias para el análisis de Monte Carlo fueron: el precio de irradiación, la cantidad irradiada, los costos directos y la inversión. Para el precio y los costos se utilizó una distribución normal con medias de \$0.1/kg y 0.032 \$/kg, respectivamente, y desviaciones estándar de \$0.01/kg y \$0.002/kg, respectivamente. Para la cantidad irradiada y la inversión se asumieron distribuciones triangulares con moda de 15,000 TM y \$7, 231,000 respectivamente, valores mínimos de 10,000 TM y \$7, 000,000 respectivamente, y valores máximos de 40,000 TM y \$8, 000,000 respectivamente. Los resultados de la simulación de Monte Carlo con 10,000 repeticiones se presentan en la Figura 5.2, donde se observa que la probabilidad de obtener un VPN negativo es del 12.5% (es decir que la probabilidad de obtener un VPN positivo es de 87.5%), el VPN esperado es de \$4, 850,893 con una desviación estándar

de \$4, 449,201. Un VPN positivo significa que se está obteniendo ganancia sobre el valor de la inversión, un VPN de cero (0) significa que se está recuperando la inversión sin obtener ganancia financiera y un VPN negativo significa que estamos obteniendo pérdidas por debajo del valor de la inversión.

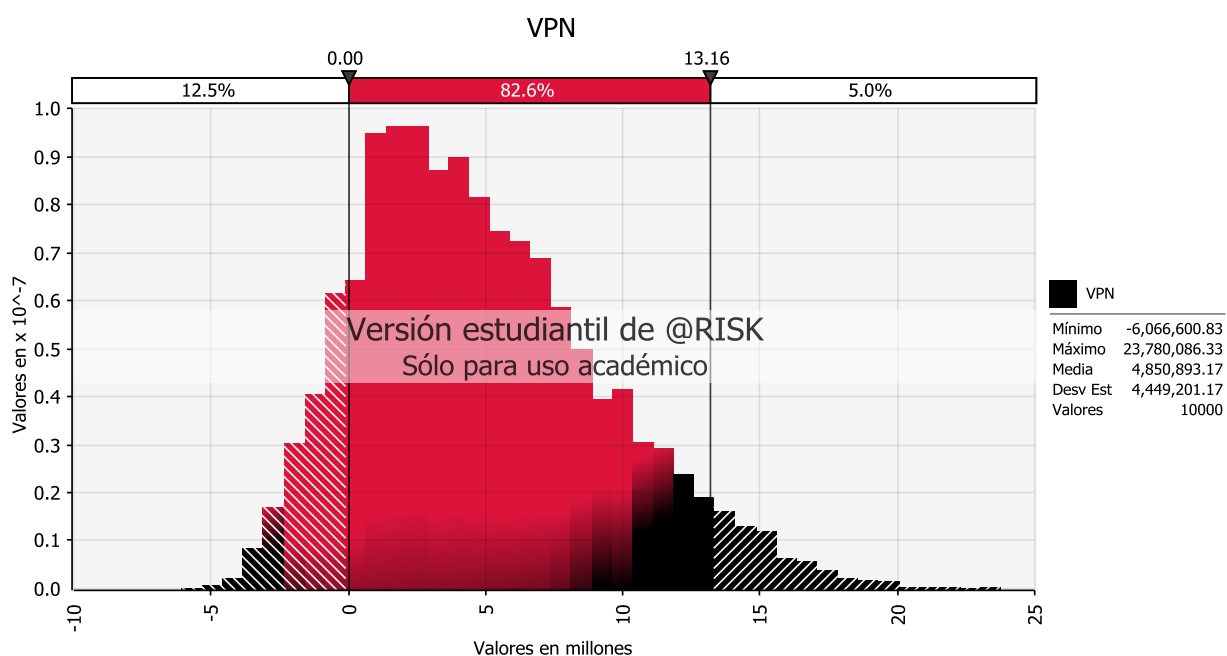


Figura 5.2 Distribución del VPN para la planta de rayos X

5.5 Resultados de la estimación del valor de la opción de diferir un año

5.5.1 Planta de cobalto 60

La opción de diferir la inversión es equivalente a una opción de compra o “call” porque se puede implementar el proyecto en el futuro si fuera conveniente, pero no es obligatorio hacerlo. Para el presente estudio se asumió que al principio se puede diferir la inversión por un año, y al final de dicho año se puede diferir la inversión por un segundo año. Vamos a asumir que después del segundo año se pierde la opción a invertir (puede ser porque el proveedor de la

tecnología no puede esperar más tiempo o porque alguien de la competencia toma el proyecto). En ausencia de la opción a diferir, y debido a la incertidumbre de muchas variables, el proyecto puede hacerse más o menos valioso a lo largo del tiempo. En la sección 4.5.1 vimos cómo este fenómeno continuo se puede simplificar mediante un modelo binomial y en la Figura 4.1 vimos cómo se puede representar mediante una malla binomial. En ese caso, el valor del proyecto sin flexibilidad (sin opciones), sigue un patrón bastante sencillo. Recordemos de la sección 4.5.1 que en el modelo binomial, dado el valor del proyecto en el período t , V_t , solo dos cosas pueden pasar al valor del proyecto en el períodos $t+1$: (i) o bien sube a $V_{t+1} = u V_t$, o bien baja a $V_{t+1} = d V_t$. Cuando $t=0$, el valor del flujo de caja descontado del proyecto (V_0) sin contar con la inversión, que asciende a \$9 millones. Los factores u y d se pueden calcular utilizando la volatilidad (σ) del flujo descontado, que asumimos del 20%, y el intervalo de tiempo (δt) que es de un año:

$$u = e^{\sigma \sqrt{\delta t}} = e^{0.2\sqrt{1.0}} = 1.2214$$

$$d = 1/u = 0.8187$$

Con el valor inicial V_0 y los factores u y d , podemos construir la evolución del valor del flujo descontado a lo largo del tiempo dependiendo de si el valor sube (u) o baja (d) en cada año. La Figura 4.1, que reproducimos en la parte superior de la Figura 5.3 a continuación resume estos valores en rojo (en millones de \$), justo encima de las fórmulas que se utilizaron en los cálculos:

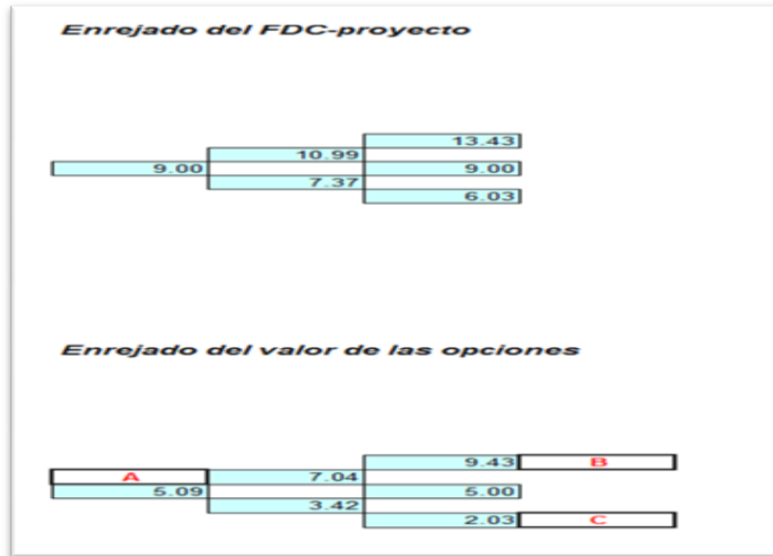
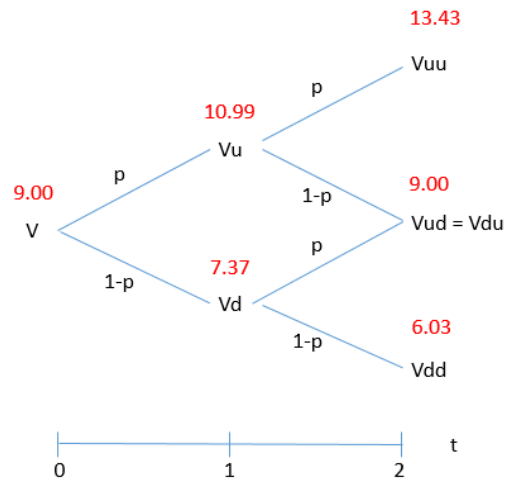


Figura 5.3 Árbol binomial opción de diferir – cobalto 60

Árbol binomial del activo subyacente con fórmulas (diagrama superior), árbol binomial del activo subyacente sin fórmulas (diagrama del centro) y diagrama del valor de las opciones de diferir (diagrama inferior) para el caso de la planta de cobalto 60. Todo en millones de dólares.

Los valores en rojo del árbol binomial superior (que corresponden a los mismos valores del árbol binomial del centro) se calcularon de la siguiente manera (en millones de dólares):

$$V_u = (9)(1.2214) = 10.99$$

$$V_d = (9)(0.8187) = 7.37$$

$$V_{uu} = (V_u)u = (10.99)(1.2214) = 12.43$$

$$V_{ud} = (V_u)d = (10.99)(0.8187) = 9.00$$

$$V_{du} = (V_d)u = (7.37)(1.2214) = 9.00$$

$$V_{dd} = (V_d)d = (7.37)(0.8187) = 6.03$$

Para obtener el valor de las opciones necesitamos primero calcular la probabilidad neutral al riesgo, ya que una opción da la oportunidad de tomar un proyecto si es bueno, pero no obliga a adoptarlo si es malo. Esta probabilidad P (y su complemento $1-P$) se calculan de la siguiente manera:

$$P = \frac{e^{rf(\delta t)} - d}{u - d} = \frac{1.01 - 0.8187}{1.2214 - 0.8187} = 0.4801$$

$$1-P = 1 - 0.4801 = 0.5199.$$

Como la opción de postergar la inversión es una opción de compra, el valor del último nodo se calcula como el máximo entre el valor neto del activo y cero. Si el valor neto del activo o proyecto es negativo, entonces no tengo la obligación de implementar el proyecto, en cuyo caso no gano ni pierdo nada; es decir, tengo un valor de 0. En cambio, si el valor neto del proyecto es positivo, lo adopto y obtengo todo su valor. Esto se expresa sucintamente de la

siguiente forma: $\max (\text{Activo} - I, 0)$. Esta fórmula se utilizó para obtener el valor de las opciones en cada nodo del diagrama inferior de la Figura 5.3. Por ejemplo, en el nodo **B** el valor neto del proyecto está dado por $\text{Activo} - \text{Costo} = \$13.43 - \$4 = \9.43 . Como es un valor positivo la opción a diferir el proyecto se ejerce si el valor sube el primer año y sube el segundo año. En el nodo **C**, ocurre lo propio, generando un valor neto de $\text{Activo} - \text{Costo} = \$6.03 - \$4 = \2.03 .

En los nodos a la izquierda de los nodos terminales el valor se obtiene con la media ponderada de los valores esperados en el próximo año, donde la ponderación viene dada por las probabilidades neutras al riesgo, y todo eso descontado un año a la tasa de interés libre de riesgo. Por ejemplo, en el nodo inicial **A**, que representa el Valor Presente Neto Extendido (VPNE) del proyecto, es decir el valor presente neto que incluye el valor de la opción de postergar el proyecto dos años consecutivos, el cálculo se realiza de la siguiente manera (en millones de \$):

$$E = \frac{P(Eu) + (1-P)Ed}{\exp(rfx \delta t)} = \frac{0.4801(7.04) + 0.5199(3.42)}{1.01} = 5.09.$$

Recordemos que el Valor Presente Neto Extendido (VPNE o E) es igual al Valor Presente Neto sin opción real (VPN) más el Valor de la Opción Real (VOR):

$$\text{VPNE} = \text{VPN} + \text{VOR}$$

Por lo tanto, despejando el Valor de la Opción Real (VOR) se obtiene (en millones de \$):

$$\text{VOR} = \text{VPNE} - \text{VPN} = 5.09 - 4.8 = 0.29.$$

En otras palabras, la opción de diferir el proyecto tiene un valor de \$290 mil. Es decir, no vale la pena invertir desde el inicio. Es mejor esperar. La Tabla 5.15 resume estos resultados para el proyecto con Cobalto 60.

Tabla 5.15 Resumen de resultados de opción de diferir – cobalto 60

Opción Real			
Presunciones		Cálculos obtenidos	
FDC (millones \$)	\$9.0	Pasos del árbol por año δt	1.0
Costos implementación (millones \$)	\$4.0	Factor u (up)	1.2214
Tiempo años	2.0	Factor d (down)	0.8187
Tasa libre de riesgo (%) r_f	1.2%	Probabilidad neutra al riesgo	0.4801
Dividendos (%)	0.00%	Resultados	
Volatilidad (%) σ	20.00%	VPN (millones \$)	4.80
Pasos del árbol	2	VPNE (millones \$)	5.09
Ecuacion nodo terminal	Max(Activo – cost , 0)	VOR (millones \$)	0.29

5.5.2 Planta de rayos X

En el caso de la planta de rayos X el análisis es similar al de la planta de Cobalto 60. Como la volatilidad es la misma para ambos proyectos, los factores u y d y la probabilidad P neutra al riesgo son los mismos. En el caso de la planta de rayos X lo que varía es el flujo de caja descontado (que es menor) y el monto de la inversión (que es mayor).

A continuación calculamos los valores del proyecto a lo largo del tiempo. Estos valores se encuentran en el árbol binomial ubicado en la parte superior de la Figura 5.4. Se calcularon de la siguiente manera (en millones de dólares):

$$Vu = (8.4)(1.2214) = 10.26$$

$$Vd = (8.4)(0.8187) = 6.88$$

$$Vu u = (Vu)u = (10.26)(1.2214) = 12.53$$

$$Vud = (Vu)d = (10.26)(0.8187) = 8.40$$

$$V_{du} = (V_d)_u = (6.88)(1.2214) = 8.40$$

$$V_{dd} = (V_d)_d = (6.88)(0.8187) = 5.63$$

Para calcular el Valor Presente Neto Extendido del proyecto de Rayos X se sigue el mismo procedimiento que en el caso del proyecto de Cobalto 60. Por ejemplo, en la parte inferior de la Figura 5.4, el valor neto del proyecto en el nodo **B** está dado por Activo – Costo = \$12.53 – \$7.2 = \$5.33 millones. Como es un valor positivo la opción a diferir el proyecto se ejerce si el valor sube el primer año y sube el segundo año. En el nodo **C**, ocurre lo contrario. El valor neto si se ejerce la opción a diferir es de Activo - Costo = \$5.63 – \$7.2 = - \$1.57, que es un valor negativo. Por lo tanto, si el valor baja el primer año y baja el segundo año, no se ejerce la segunda opción a diferir. El Valor Presente Neto Extendido (VPNE, también denominado E) en el nodo **A** se calcula como en la sección precedente (en millones de \$):

$$E = \frac{P(Eu) + (1-P)Ed}{\exp(r_{fx} \delta t)} = \frac{0.4801(3.15) + 0.5199(0.57)}{1.01} = 1.78$$

Finalmente, el Valor de la Opción Real (VOR) se calcula, al igual que en la sección anterior, como la diferencia entre el Valor Presente Neto Extendido (VPNE) y el Valor Presente Neto (VPN):

$$VOR = VPNE - VPN = \$1.78 \text{ millones} - \$1 \text{ millón} = \$0.78 \text{ millones}$$

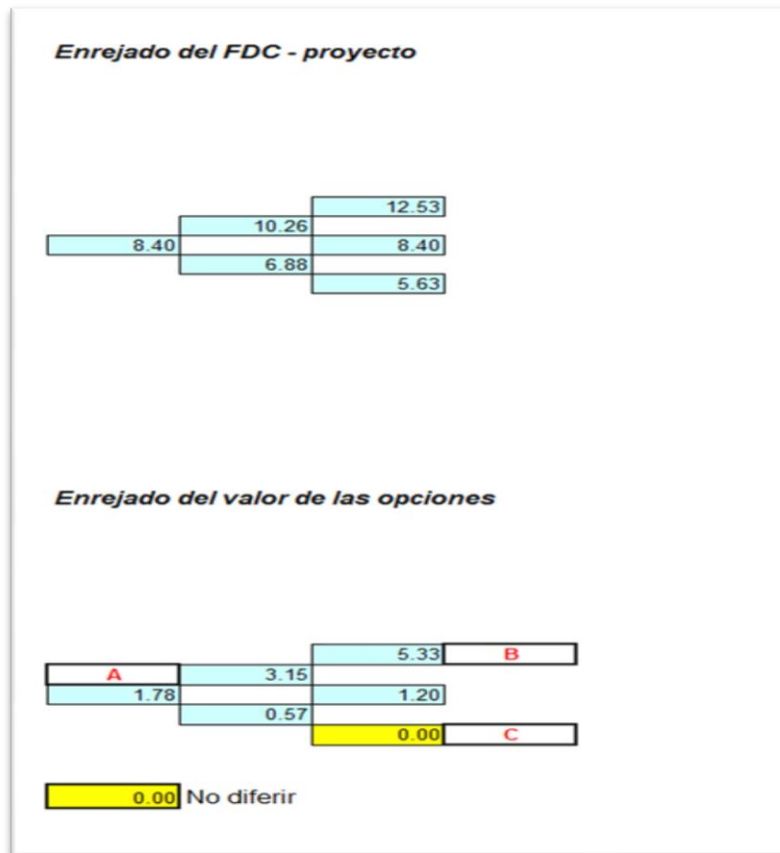


Figura 5.4 Árbol binomial opción de diferir – rayos X

Diagrama de árbol binomial del activo subyacente y valor de las opciones de diferir para el caso de la planta de rayos X.

El resumen de los supuestos y resultados del proyecto de rayos X se presentan a continuación en la Tabla 5.16

Tabla 5.16 Resumen de resultados de opción de diferir – rayos X.

Opción Real			
Presunciones		Cálculos obtenidos	
FDC (millones \$)	\$8.4	Pasos del árbol por año δt	1.0
Costos implementación (millones \$)	\$7.2	Factor u (up)	1.2214
Tiempo años	2.00	Factor d (down)	0.8187
Tasa libre de riesgo (%) r_f	1.200%	Probabilidad neutral al riesgo	0.4801
Dividendos (%)	0.00%	Resultados	
Volatilidad (%) σ	20.00%	VPN (millones \$)	1.00
Pasos del árbol	2	VPNE (millones \$)	1.78
Ecuación nodo terminal	Max(Activo – cost, 0)	VOR (millones \$)	0.78

6 CONCLUSIONES

- El costo de inversión de la planta de cobalto 60 y rayos X, es \$4 y \$7 millones, respectivamente. Por lo tanto, la inversión en la planta de rayos X es casi dos veces mayor que la inversión en la planta de cobalto 60. Los costos directos unitarios de la planta de rayos X son 40% mayores que los de la planta de Cobalto 60.

- El volumen de producto irradiado no se conoce y es difícil de estimar. Para realizar el estudio de factibilidad económica se utilizó un valor de 15,000 TM por año, que representa aproximadamente un 30% del total de la producción de frutas importantes durante el 2011 (aguacate, china, mangó, melón, piña, y papaya). Este volumen representa un porcentaje mucho menor del total de la producción irradiable de PR si se consideran otras frutas tradicionales y no tradicionales.

- Asumiendo un precio de irradiación de \$ 0.10/kg y un volumen anual de irradiación de 15,000 TM, ambos proyectos son financieramente factibles, pero la planta de Cobalto 60 es económicamente más atractiva que la de rayos X. En concreto, el Proyecto de cobalto 60 tiene un VPN positivo de \$ 4,807,694 y una TIR del 17 %, mientras que el proyecto de rayos X tienen un VPN positivo de \$ 1,094,310 y una TIR del 7%. En concreto, la planta de cobalto 60 es casi 4 millones de dólares más valiosa que la de rayos X.

- El análisis de sensibilidad indica que el precio del producto irradiado y la cantidad de producto irradiado son, en ese orden de importancia, las dos variables más críticas que determinan el grado de factibilidad económica de ambos proyectos.

- El análisis de equilibrio de precios nos indica que el costo de producción de cada kg irradiado en la planta de cobalto 60 es de \$0.064 mientras que en la de rayos X es de \$0.093; es decir, el costo de irradiación en la planta de rayos X es casi un 50% superior al costo de producción de la planta de cobalto 60.

- El análisis de equilibrio de cantidades nos indica que se requieren 8.2 mil TM de producto irradiado para que la planta de cobalto 60 empiece a ser rentable, mientras que la planta de rayos X requiere de 13.4 mil TM para empezar a ser rentable.

- La simulación Monte Carlo nos indica que las variables más influyentes sobre el VPN son el precio y la cantidad a irradiar.

- El análisis de opciones reales nos indica que es deseable contar con la flexibilidad de poder decidir cuándo invertir en el proyecto.

- Una primera conclusión es entonces, que ambos proyectos pueden ser rentables para Puerto Rico si se logra conseguir el volumen mínimo necesario de producto y cobrar el monto mínimo necesario para hacer cada uno de estos proyectos financieramente viables.

- Una segunda conclusión es que el proyecto de cobalto 60 es más atractivo financieramente que el proyecto de rayos X.

- Una tercera conclusión es que esperar tiene valor. De hecho, si la variabilidad de la cantidad potencialmente irradiada fuera mayor a la asumida en este estudio, el valor de esperar sería mucho mayor también.

- Dado que una de las variables más críticas (la cantidad a ser irradiada) para el valor de estos proyectos es también una de las más desconocidas, gran parte de las conclusiones sobre las

bondades de estos proyectos pueden verse seriamente afectadas si la cantidad a ser irradiada fuera sustancialmente menor a la prevista.

- Este estudio solo tomo en cuenta variables financieras. Por ejemplo, desde la perspectiva netamente financiera y si se llegara a cumplir con volúmenes mínimos de producto irradiado, la planta de cobalto 60 se constituye en una mejor opción de inversión que la de rayos X. Estas conclusiones pueden verse seriamente modificadas si en el análisis se consideraran aspectos políticos o de percepción social de ambos proyectos.

7 RECOMENDACIONES

Ambos proyectos parecen ser rentables, especialmente el de la planta de cobalto 60. Sin embargo, esta aseveración depende crucialmente del precio a cobrar por la irradiación y del volumen que se podría conseguir para irradiar. De estas dos variables, la del precio no es tan preocupante debido a que se trata de apenas unos centavos de dólar por kilo de producto irradiado. Sin embargo, es difícil saber si realmente se podría conseguir como mínimo los 8 mil TM de producto para hacer que la planta de cobalto 60 comience a ser rentable. Esto es particularmente preocupante dada la tendencia a la caída en la producción de frutas y granos en Puerto Rico. En la medida en que el riesgo de no poder garantizar este volumen mínimo sea mayor, este proyecto no solo pierde atractivo, sino que se hace cada vez más deseable esperar o, mejor aún, continuar investigando sobre este tema. Por lo tanto, una primera recomendación antes de llevar a cabo una inversión de este tipo, es la de realizar un estudio detallado de la demanda potencial por servicios de irradiación de productos agrícolas.

Una segunda recomendación es la de realizar un estudio sociológico o de comunicación relacionado con la reacción que podría provocar en la comunidad local un proyecto de inversión de este tipo. Preocupa particularmente cómo reaccionaría la población ante un proyecto como el de cobalto 60, que si bien es más rentable y no genera grandes riesgos comprobados, puede ser percibido de otra forma, ocasionando la inviabilidad política de un proyecto que de otra forma puede ser financieramente interesante. En caso de que el proyecto tenga el riesgo de ser políticamente inviable, un tema que podría ser interesante estudiar es cuál sería la mejor estrategia comunicacional para lograr concientizar a la población sobre las bondades del proyecto.

8 LITERATURA CITADA

Aguirre, J. S., Rodríguez, M. R. y García, G. D. (2011). Effects of electron beam irradiation on the variability in survivor number and duration of lag phase of four food borne organisms. *International Journal of Food Microbiology*, (149), 236-246.

Amram, M. y Kulatilaka, N. (1999). *Opciones reales: Evaluación de inversiones en un mundo incierto*. Harvard, Business School Press.

Arvanitoyannis, I. S. (2010). *Irradiation of food commodities: techniques, applications, detection, legislation, safety and consumer opinion*. San Diego, CA, USA: Elsevier.

Black, F. y Scholes, M. (1973). Pricing of options and corporate liabilities. *Journal of Political Economy*, 81(3), 637-654.

Brealey, R., Myers, S. C., y Allen, F. (2010). *Principios de finanzas corporativas*, 9.^a ed. Distrito Federal, Mexico: McGrawHill, 268.

Castro, J. L., Díaz, M. G., Delgado, M. J., Barroso, S. R. y Díez, L. M. (2011). Effect of electron-beam irradiation on cholesterol oxide formation in different ready to eat foods. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, (12), 519-525.

Chambers, R. G. (1988). *Applied Production Analysis: A Dual Approach*. Cambridge University Press.

Chmielewski, A. G. (2006). Worldwide developments in the field of radiation processing of materials in the down of 21st century. *Nukleonika*, (51), 3-9.

Cleland, M. R. (2006). Advances in gamma ray, electron beam, and X-ray technologies for food irradiation. En Sommers, C. H. y Fan, X. (Eds.), *Food Irradiation Research and Technology*. Chicago: IFT Press.

Codex Alimentarius. (2003). General standard for irradiated foods. *Codex stand 106 – 1983*, Rev. 1-2003.

Comas, M. (2013). Departamento de Agricultura de Puerto Rico. El nuevo día. Recuperado

<http://www.elnuevodia.com/negocios/finanzas/nota/arroz-y-habichuelas-desde-el-boricua>

Cox, J. C. , Ross, S. A. y Rubinstein, M. (1979). Option pricing – simplified approach. *Journal of financial economics*, 7(3), 229-263.

Dixit, J. P. y Pindyck, R. S. (1994). *Investment under uncertainty*. United Kingdom: Princeton University Press.

EPA, Environmental Protection Agency. (2016). *Food irradiation*. USA. Recuperado de http://www.epa.gov/radiation/sources/food_irrad.html.

Eustice, R., y Brubn, C. M. (2013). *Consumer acceptance and marketing of irradiated foods*. Blackwell Publishing and Institute of Food Technologists.

Farias, A. A., Potenza, M. R., Reis, F. C. y Sato, M. E. (2015). Lethal dose determination of cobalt-60 for adult, *Tribolium castaneum* (coleoptera: Tenebrionidae) and *Cryptolestes ferrugineus* (coleoptera: Laemophloeidae). *Asociación Brasileira de Energía Nuclear ABEN*.

Hallman, G. (2011). Phytosanitary applications of irradiation. USDA-ARS. Texas, USA. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 10.

Hallman , G. y Blackburn, C. M. (2016). Phytosanitary irradiation. MDPI. *Foods*.

Hong, Y., Park, J., Park, J. H., Chung, M. S., Kwon, K., Chung, K., Won, M. y Song, K. B. (2008). Inactivation of *Enterobacter sakazakii*, *Bacillus cereus*, and *Salmonella typhimurium* in powdered weaning food by electron beam irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, (77),1097-1100.

IAEA. (2004). Irradiation as a phytosanitary treatment of food and agricultural commodities. Proceedings of a final research coordination meeting organized by the joint FAO/IAEA division of nuclear in food and agriculture 2002.

IAEA. (2006). Use of irradiation to ensure the hygienic quality of fresh, pre-cut fruits and vegetables and other minimally processed food of plant origin. Nuclear techniques in food and agriculture and held in Islamabad, Pakistan-2005.

- IAEA. (2008). Trends in radiation sterilization of health care products. Vienna, Austria.
- IAEA. (2009). Irradiation to ensure the safety and quality of prepared meals; results of the coordinated research project organized by the joint FAO/IAEA division of nuclear techniques in food and agriculture 2002- 2006.
- IAEA. (2010). Radiation safety of gamma, electron and X ray irradiation facilities. Vienna, Austria.
- IAEA. (2013). Guidelines for the development, validation and routine control of industrial radiation processes. *Radiation technology* series No. 4.
- IAEA. (2016). Radiation safety for consumer products. Specific safety guide. Safety standards series No. SSG-36
- IAEA y FAO. (1990). Food irradiation for developing countries in Africa. Vienna, TECDOC-576.
- IAEA y FAO. (1995). Irradiation to ensure hygienic quality of fresh and frozen seafood. Vienna, Austria. *Head, Food Preservation Section*.
- IAEA, FAO y WHO. (1993). Cost – benefit aspects of food irradiation processing. Irradiación para el comercio internacional de productos agropecuarios. IAEA-SM-328/13.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2004). Directory of gamma processing facilities in Member States. Vienna: IAEA-DGPF/CD.
- Jenkins, D. y Goenaga, R. (2008). Host breadth and parasitoids of fruit flies (*Anastrepha* spp.) (Diptera: Tephritidae) in Puerto Rico. USDA - ARS, Mayagüez, Puerto Rico: *Environmental Entomology*, 37(1),110-120.
- Jo, C. (2009). Microbial inactivation and shelf life extension of Korean traditional prepared meals by irradiation. *Department of Animal Science and Biotechnology*, Republic of Korea.
- Johnson, J. y Marcotte, M. (1999). Irradiation control of insect pests of dried fruits and walnuts. *Food Technology*, (53), 6.

Junta de Planificación de Puerto Rico. (2015). Apéndice estadístico del informe económico al Gobernador y a la Asamblea Legislativa.

Kalyani, B. y Manjula, K. (2014). Food irradiation – technology and application. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(4), 549-555.

Kester, W.C. (1984). Today options for tomorrow's growth. pp. 153-160.

Kodukula, P. y Papudesu, C. (2006). *Project valuation using real options; a practitioner's guide*. Estados Unidos: Ross Publishing, Inc.

Lacroix, M., Turgis, M., Borsa, J., Millette, M., Salmieri, S., Caillet, S y Han, J. (2009). Applications of radiation processing in combination with conventional treatments to assure food safety: new development. *Radiation Physics and Chemistry*, (78), 1015-1017.

Laffont, J.-J. (1989). The economics of uncertainty and information. Cambridge, Massachusetts. *The MIT Press*.

Luckman, G. J. (2002). Food irradiation: regulatory aspects in the Asia and Pacific region. *Radiation Physics and Chemistry*, (63), 285-288.

Mentzer, R. (1989). An economic analysis of electron accelerators and cobalt-60 for irradiating food. Economic Research Service. United States Department of Agriculture. Technical Bulletin 1762.

Merton, R.C. (1973). Theory of rational option pricing. *Bell journal of economics*, 4(1), 141-183.

Miller, R. B. (2005). *Electronic irradiation of foods. An introduction to the technology*. New Mexico, USA: Springer.

Mittendorfer, J., Bierbaumer, H., Gratzl, F. y Kellauer, E. (2002). Decontamination of food packaging using electron beam status and prospects. *Radiation Physics and Chemistry*, (63), 833-836.

Molins, R.A. (2001). *Food irradiation: principles and applications*. USA. Wiley – Interscience.

Morales, J.P. (2010). Exploring the unexplored in the Caribbean: traditional and emerging fruit crops in Puerto Rico, the Dominican Republic and Haiti. *Journal of the American Pomological Society*, 64(1), 14-23.

Morrison, R. M. (1989). An economic analysis of electron accelerators and cobalt-60 for irradiating food. Washington, DC: Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture. (Technical bulletin No.1762).

Moosekian, S. R., Jeong, S. y Ryser, E. T. (2014). Inactivation of sanitizer-injured *Escherichia coli* 0157:H7 on baby spinach using X-ray irradiation. *Food Control*, (36), 243-274.

Mostafavi, H.A., Fathollahi, H., Motamedi, F. y Mirmajlessi, S.M. (2009). Food irradiation: Applications, public acceptance and global trade. *African Journal of Biotechnology*, (9), 2826–2833.

Moy, J. H. y Wong, L. (2002). The efficacy and progress in using radiation as a quarantine treatment of tropical fruits – a case study in Hawaii. *Radiation Physics and Chemistry*, (63), 397-401.

Mun, J. (2002). *Real options analysis, tools and techniques for valuing strategic investments and decisions*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Mun, J. (2006). *Modeling risk. Applying Monte Carlo simulation, real options analysis. Forecasting, and optimization techniques*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Nketsia-Tabiri, J., Adu-Gyamfi, A. y Bah, F. (2009). Irradiation of prepared meals for microbiological safety and shelf life extension. *Biotechnology & Nuclear Agriculture Research Institute*, Ghana.

Nordion Inc. (2016) Why gamma. Recuperado de <http://www.nordion.com/gamma-technologies/gamma/>.

Organización Mundial del Comercio OMC (1998). Explicación del acuerdo medidas sanitarias y fitosanitarias, disponible en: https://www.wto.org/spanish/tratop_s/sps_s/spsund_s.htm. Consultado en marzo 2016

Osterholm, M. T. y Norgan, A. P. (2004). The role of irradiation in food safety. *The New England Journal of Medicine*, (18), 350.

Pillai, S.D. y Shayanfar, S. (2015). *Electron beam pasteurization and complementary food processing technologies*. United Kingdom. Elsevier. pp.7-20.

Porter, M. E. (1998). *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. Free Press.

Rangel, U. (23 de enero 2016). Aplicación de la irradiación gamma. Recuperado <http://www.inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/Aplicacion%20de%20la%20irradiacion.pdf>

Sabharwal, S. (2013). Electron beam irradiation applications. *Radioisotope Products and Radiation Technology Section*. Vienna, Austria.IAEA.

Sadecka, J. (2007). Irradiation of spices – a review. *Czech Journal of Food Science*, (25), 231-242.

Sharma, A., Chander, R., Chawla, S.P., Kanatt, S.R. y Dhokne, V.S. (2009). Radiation processing to ensure the safety and quality of ethnic prepared meals. *Irradiation to ensure the safety and quality of prepared meals*. IAEA

Skowron, K., Olszewska, H., Paluszak, Z., Zimek, Z., Kaluska, I. y Skowron, K.J. (2013). Radiation hygienization of cattle and swine slurry with high energy electron beam. *Radiation Physics and Chemistry*, (87), 88-96.

Sommers, C.H. y Fan, X. (2006). *Food irradiation research and technology*. United States. Blackwell Publishing. IFT Press.

Steele, J.H. (2001). Food irradiation: A public health challenge for the 21st century. *Clinical Infectious Diseases*, (33), 376-377.

Tahergorabi, R., Matak, K., y Jaczynski, J. (2012). Application of electron beam to inactivate *salmonella* in food : Recent developments. *Food Research International*, (45), 685-694.

- Thomopoulos, N. T. (2015). *Demand forecasting for Inventory Control*. Springer.
- Thongphasuk, P. y Thongphasuk, J. (2012). Effects of irradiation on active components of medicinal plants: A review. *Rangsit Journal of Arts and Sciences RJAS*, (2) 57-71.
- U.S. Department of Agriculture. (2014). Agricultural Projections to 2023. Long- Term Projections. Economic Research Service, Report OCE -2014-1.
- U.S. Department of the Treasury. (2017). Resource Center. Recuperado <https://www.treasury.gov/resource-center/data-chart-center/interest-rates/Pages/TextView.aspx?data=yield>
- Wiendl, T.A., Wiendl, F.W., Arthur, P.B., Franco, S.S., Franco, J.G. y Arthur, V. (2013). Effects of gamma radiation in tomato seeds. International Nuclear Atlantic Conference.
- Wilcock, A., Pun, M., Khanona, J. y Aung, M. (2004). Consumer attitudes, knowledge and behaviour: a review of food safety issues. *Trends in Food Science & Technology*, (15), 56-66.
- Yu, D. y Xianwen, K. (2010). The application of electron beam irradiation on fruits preservation. *Scientific Research*.