

Máster Universitario en Ciencias Actuariales y Financieras
2020-2021

Trabajo Fin de Máster

“Bonos catastróficos para accidentes
nucleares: método alternativo de
transferencia de riesgos”

Silvia Gómez Cifuentes

Tutores

José Miguel Rodríguez-Pardo del Castillo

Jesús Ramón Simón del Potro

Madrid, julio 2021

Esta tesis es propiedad del autor. No está permitida la reproducción total o parcial de este documento sin mencionar su fuente. El contenido de este documento es de exclusiva responsabilidad del autor, quien declara que no se ha incurrido en plagio y que la totalidad de referencias a otros autores han sido expresadas en el texto.

En caso de obtener una calificación igual o superior a 9.0 (Sobresaliente), autorizo la publicación de este trabajo en el centro de Documentación de la Fundación Mapfre.

Sí, autorizo a su publicación.

No, desestimo su publicación

Firmado: Silvia Gómez Cifuentes.

DETECCIÓN DEL PLAGIO

La Universidad utiliza el programa **Turnitin Feedback Studio** para comparar la originalidad del trabajo entregado por cada estudiante con millones de recursos electrónicos y detecta aquellas partes del texto copiadas y pegadas. Copiar o plagiar en un TFM es considerado una **Falta Grave**, y puede conllevar la expulsión definitiva de la Universidad.



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**

Resumen

Accidentes nucleares como el de Fukushima, ponen de relieve la grave magnitud de las potenciales pérdidas que pueden llegar a causar las centrales nucleares, apremiando la necesidad de desarrollar un producto financiero que pueda cubrir esta responsabilidad de forma ilimitada e íntegra, ante el acaecimiento de una emergencia. El presente trabajo tiene como objetivo principal proponer los bonos catastróficos como eventual herramienta clave para cubrir los riesgos nucleares. Por ello, se plantea una metodología que valora el precio de estos bonos catastróficos nucleares (N-CAT), utilizando una estructura de dependencia semi-Markoviana en tiempo continuo y realizando una aplicación numérica para ilustrar las conclusiones claves.

Palabras clave: *bonos catastróficos (CAT), eventos catastróficos, riesgos nucleares, energía nuclear, accidentes nucleares, cadenas semi-Markovianas.*

Abstract

Nuclear accidents such as Fukushima, highlight the serious magnitude of the potential losses that can be caused by nuclear power plants and the need to develop a financial product that can fully and unlimitedly cover this liability, in the event of an emergency. The main objective of this paper is to propose catastrophe bonds as an eventual key tool to cover nuclear risks. Therefore, a methodology that values the price of these nuclear catastrophe bonds (N-CAT) is proposed, using a semi-Markovian dependence structure in continuous time and performing a numerical application to illustrate the key conclusions.

Key words: *catastrophe (CAT) bonds, catastrophic events, nuclear risks, nuclear energy, nuclear accidents, semi-Markov chains.*

Contents

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: BONOS CAT	2
1.1 RESEÑA HISTÓRICA	2
1.2 FUNCIONAMIENTO	3
1.2.1 OTROS ILS	6
1.2.2 MECANISMOS DE ACTIVACIÓN (TRIGGERS)	8
1.3 MERCADO PRIMARIO Y SECUNDARIO	14
1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS FRENTE AL REASEGURO	14
1.5 EVOLUCIÓN DEL MERCADO	15
1.6 CAMBIO CLIMÁTICO	17
1.7 PROGRAMA MULTICAT	20
CAPÍTULO II: ENERGÍA NUCLEAR	22
2.1 INTRODUCCIÓN	22
2.2 PRINCIPALES USOS	25
2.3. PELIGROS	27
2.4 LEGISLACIÓN	34
2.5 COBERTURA	40
2.5.1 ASEGURADORAS	40
2.5.2 CONSORCIOS (POOLS)	42
2.5.3 BONOS N-CAT	48
2.5.4 OTRAS ALTERNATIVAS	51
CAPÍTULO III: VALORACIÓN DE LOS BONOS N-CAT	54
3.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA	54
3.2 TEORÍA DE LA VALORACIÓN	55
3.3 PROCESO DE TIPOS DE INTERÉS	58

3.3.1 MODELO CIR	58
3.3.2 ESTIMACIÓN DE MÁXIMA VEROSIMILITUD	59
3.4 PROCESO DE RECLAMACIONES AGREGADAS (CADENAS SEMI-MARKOVIANAS) . .	60
3.5 TARIFICACIÓN	65
3.6 PROBABILIDADES DE INCIDENTES Y ACCIDENTES NUCLEARES	66
3.7 CASO PRÁCTICO	68
3.8 RESUMEN	73
CONCLUSIÓN	74
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXO - CÓDIGO EN R	87

List of Figures

1	Estructura de los bonos catastróficos. (Fuente: elaboración propia)	4
2	Inversores por países, 2020. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Aon Securities LLC)	5
3	Capital de riesgo de los bonos CAT por tipo de activación. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del directorio de transacciones de Artemis)	12
4	Comparación entre tipo de activadores. (Fuente: elaboración propia)	13
5	Bonos CAT emitidos e importe pendiente, 1997-2020. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del directorio de transacciones de Artemis)	16
6	Pérdidas aseguradas por catástrofes naturales, 1980-2020. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del directorio de transacciones de Artemis)	18
7	Producción mundial de electricidad por fuentes, 1990-2020. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de IEA)	23
8	Plantas nucleares por países. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Statista)	24
9	Accidentes graves a partir de 5 fatalidades, diferenciados por tipo de energía, 1970-2008. (Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos de Burgherr et al., 2010)	27
10	Daños materiales por accidentes causados por fuentes de energía, expresado en miles de millones de dólares, 1970-2007. (Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos de Sovacool et al, 2008)	28
11	Representación piramidal de la escala INES. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INES)	29
12	Descripción general de los niveles INES. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INES)	30
13	Los 15 accidentes nucleares más costosos. (Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos de Sovacool et al., 2017)	32
14	Aceleración vertical de terremotos en el territorio español. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INE)	34
15	Tramos de responsabilidad del Convenio de París. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de MITECO	37
16	Países y Convenios donde son Partes Contratantes. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de World Nuclear Association)	38

17	Flujo de negocio de los seguros nucleares. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Nuclear Risk Insurers)	45
18	Miembros del Pool Atómico Español. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de INESE)	47
19	Base de datos de accidentes nucleares 1951-2020. (Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos del directorio de INES)	67
20	Probabilidades de accidentes nucleares. (Fuente: elaboración propia)	67
21	Diagrama de flujos entre estados. (Fuente: elaboración propia)	70
22	Valor de los bonos N-CAT con un valor nominal de 1000€. (Fuente: elaboración propia) . . .	72
23	Representación gráfica del valor de los bonos N-CAT. (Fuente: elaboración propia)	72

INTRODUCCIÓN

El huracán Katrina o el accidente nuclear de Chernóbil son ejemplos representativos de los eventos catastróficos más conocidos por todos, pues las pérdidas humanas y materiales que dejaron a su paso son innumerables. Estas pérdidas causadas por eventos catastróficos, tales como huracanes, inundaciones o incendios, así como otras catástrofes provocadas por el hombre, como son los accidentes nucleares, llegan a ser tan cuantiosas que presentan un grave problema a las entidades aseguradoras y consorcios, que solo llegan a dar coberturas limitadas.

En los países de la OCDE, según los acuerdos existentes, la compensación de estos daños se transfiere al sobrepasar cierto umbral a los gobiernos, de forma explícita o implícita. Se limita así la responsabilidad de la industria a una pequeña fracción de los daños a terceros que podrían llegar a producirse en caso de un grave accidente nuclear.

En este trabajo se presenta, como método alternativo para cubrir estos costes, la emisión de bonos ligados a las catástrofes (CAT), transfiriendo el riesgo a los mercados financieros. A cambio de asumir este riesgo, los inversores reciben unos competitivos tipos de interés, a condición de que, si se produce el evento catastrófico predeterminado, los inversores pierden el capital invertido; el emisor de estos bonos, que a menudo suelen ser compañías de seguros, recibe el dinero para poder así hacer frente a sus pérdidas.

Así pues, este proyecto se centrará en modelizar y valorar el precio de los bonos catastróficos para riesgos nucleares, con un tipo de cobertura doble. En el mercado financiero actual no existen bonos de riesgo catastrófico que estén diseñados específicamente para cubrir las pérdidas de las catástrofes nucleares, puesto que, aunque la probabilidad de que ocurra un accidente nuclear grave es baja, la industria aseguradora actual no es capaz de hacer frente a los costes. Sin embargo, al transferir estos riesgos al mercado de capital, mediante los bonos catastróficos nucleares (N-CAT), se puede llegar a incrementar la capacidad financiera.

Este trabajo queda dividido en tres capítulos. En el Capítulo I se explicará y analizará el funcionamiento y la importancia de los bonos catastróficos en el mercado actual, evaluando su trayectoria.

En el Capítulo II se estudiarán los beneficios, inconvenientes y regulación de la energía nuclear, se analizará cómo se cubren hoy en día los riesgos nucleares, presentado los bonos nucleares catastróficos (N-CAT) como potencial alternativa.

Por último, en el Capítulo III se modelizará y valorará el precio de los bonos catastróficos para riesgos nucleares (N-CAT), incluyendo un ejemplo práctico.

CAPÍTULO I: BONOS CAT

1.1 RESEÑA HISTÓRICA

El mercado de los bonos catastróficos nació en una de las épocas más difíciles para los seguros del hogar y de accidentes. En 1992, el huracán Andrew azotó severamente a Florida, Estados Unidos, dejando daños valorados en 27 mil millones de dólares, de los cuales 15.5 mil millones estaban cubiertos mediante pólizas de seguro. Muchas entidades aseguradoras no pudieron hacer frente al alto coste de estos daños, y en consecuencia, ocho de ellas quebraron (Insurance Information Institute, 2012).

Andrew fue el huracán que más fuerte azotó al país hasta la fecha, dejando los daños materiales más costosos hasta entonces vistos en Estados Unidos. Aún hoy en día, este huracán se encuentra en el segundo puesto como el desastre natural más costoso de Estados Unidos, tan solo superado por el huracán Katrina en 2005. Tras este accidente, muchas de las empresas aseguradoras decidieron que era demasiado arriesgado seguir ofreciendo pólizas de seguro en toda la costa del país; el riesgo era demasiado alto. Financieramente no eran capaces de hacer frente a los altos costes que los desastres naturales dejaban a su paso. Así, a muchas familias se les empezó a negar la posibilidad de tener seguros para el hogar o se les aumentó notablemente el precio de los mismos (Insurance Information Institute, 2012).

Para intentar solventar este problema, se crearon programas estatales de seguros financiados con fondos públicos para cubrir las pérdidas relacionadas con las catástrofes naturales. Sin embargo, debido a la alta demanda de seguros por parte de empresas y particulares, se empezaron a buscar otras soluciones. Nació así la idea de transferir el riesgo de las catástrofes de las aseguradoras al mercado financiero mediante la emisión de bonos catastróficos, puesto que los mercados financieros globales son los únicos que tienen una reserva en efectivo lo suficientemente grande como para poder cubrir estas pérdidas tan altas (Insurance Information Institute, 2012; Shao, J., 2015).

En 1997 se empezaron a emitir los primeros bonos catastróficos, y desde entonces este mercado ha crecido rápidamente, ofreciendo cobertura a numerosos tipos de catástrofes en todo el mundo. Hoy en día, los bonos de riesgo catastrófico son los valores financieros vinculados a seguros más populares (Insurance Information Institute, 2012). Estos bonos permiten a las compañías de seguro paliar parte de los riesgos a los que se tendrían que enfrentar en caso de una catástrofe, pues los costes llegan a ser tan altos que no se pueden cubrir mediante las primas que cobran y el rendimiento que obtienen de las inversiones que realizan.

1.2 FUNCIONAMIENTO

A gran escala, los bonos CAT permiten a los inversores obtener un beneficio económico, siempre y cuando no se produzca una catástrofe. En síntesis, los inversores apuestan por la posible ocurrencia de una catástrofe natural determinada de gran envergadura durante un periodo determinado, y por si la ganancia que obtendrán sobre la inversión principal compensa el riesgo potencial de perder parte o la integridad de su capital en el caso de que tal evento se produzca en el plazo establecido (Polacek A., 2018).

Hay tres figuras claves implicadas en la transacción de los bonos de catástrofe:

1. **Sponsors:** cuyos riesgos se transfieren al mercado mediante la emisión de estos bonos. Los *sponsors* serán principalmente entidades aseguradoras y reaseguradoras, aunque también podemos encontrar agencias gubernamentales y empresas no financieras. Son los emisores de los bonos CAT, aunque no los emiten ellos directamente, sino que usan un Vehículo de Cometido Especial (SPV) para ello.
2. **Contraparte:** son los inversores, quienes asumirán los riesgos transferidos. Los principales inversores suelen ser fondos de pensiones, fondos de cobertura y otros inversores institucionales.
3. **Vehículo de Cometido Especial o SPV (“*Special Purpose Vehicle*”):** es la entidad encargada de emitir estos bonos. Su propósito será funcionar como vehículo, transfiriendo estos riesgos definidos del sponsor a los inversores, para ello suscriben un contrato de reaseguro con el sponsor. Estas entidades funcionan comúnmente como intermediarias entre las partes y suelen estar localizadas en paraísos fiscales para poder obtener mejores tasas impositivas, como pueden ser Irlanda o las Islas Caimanes (Swiss Re, 2011). Los *sponsors* prefieren usar un SPV para poder captar las ventajas fiscales y contables asociadas con el reaseguro tradicional ¹, mientras que los inversores también prefieren usar un SPV para reducir el riesgo de crédito por parte de las aseguradoras y reaseguradoras (Cummis, 2008).

Por lo tanto, los inversores compran los bonos catastróficos al SPV, que simultáneamente firmará un contrato de reaseguro con el sponsor. El principal que pagan los inversores se invierte en una cuenta colateral (“*collateral account*”) que normalmente ofrece tipos de interés muy bajos, ya que se invierte en activos sin riesgo, buscando que el riesgo de crédito sea nulo. Los intereses que genera esta cuenta colateral se usarán para pagar a los inversores los cupones del bono, consiguiendo así que el bono se compense con un diferencial elevado (Insurance Information Institute, 2015).

¹En 2003 Harrington and Niehaus argumentaron que una ventaja importante de los bonos CAT como instrumentos de financiación es que los costes del impuesto de sociedades son más bajos que los de la financiación a través de fondos propios. Además, estos bonos tienen menor riesgo de posibles reducciones de categoría en su calidad crediticia (“*downgrading risk*”).

Si se produce un evento catastrófico determinado en el periodo de tiempo especificado y los costes superan un umbral económico de franquicia, entonces, el inversor renuncia a toda o una parte de la inversión, que se liquida por parte de la aseguradora y se utiliza para reembolsar al sponsor, según los términos determinados en el contrato. No obstante, si no se produce el evento catastrófico determinado, el bono CAT se comportará como un bono normal, y el inversor recibirá sus cupones hasta el vencimiento, así como el principal en el momento de vencimiento (Insurance Information Institute, 2015).

Debido al riesgo que corren los inversores de perder los intereses e incluso el principal, dependiendo de las condiciones del contrato, los bonos CAT ofrecen a los inversores un tipo de interés más alto que otro tipo de bonos, es por ello que se consideran **bonos de alto rendimiento (“high yield”)** (Insurance Information Institute, 2015).

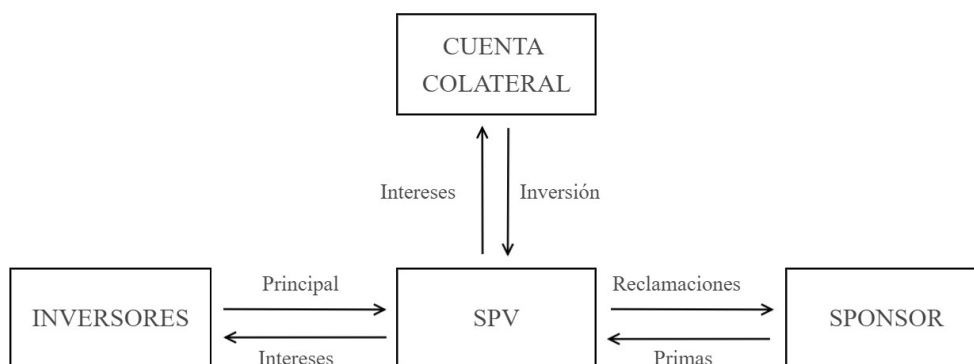


Figure 1: Estructura de los bonos catastróficos. (Fuente: elaboración propia)

Cabe remarcar que no hay una sola estructura de pagos que se aplique a todos los bonos CAT. Normalmente, estos bonos suelen tener una garantía de cupón del primer año, es decir, los inversores siempre reciben los cupones correspondientes al primer año. En el caso de que tengan una estructura de cupones que se paguen de forma semestral o trimestralmente, se repartirán entonces los dos o cuatro primeros cupones respectivamente (Swiss Re, 2011; Cummis, 2008).

Por lo general, el vencimiento medio de estos bonos es de entre 1 a 4 años, aunque los hay de más de 5 años, a diferencia del reaseguro tradicional, cuyo periodo de vencimiento es anual. Esta protección multianual supone una ventaja para los *sponsors*, que se protegen ante las fluctuaciones cíclicas de los precios en el mercado de reaseguros. Por un lado, los *sponsors* prefieren periodos de vencimiento más largos, puesto que los bonos CAT son una fuente fiable de capital que permite amortizar los costes de su emisión durante un periodo más largo de tiempo. Por otro lado, los inversores prefieren bonos con periodos de vencimiento más cortos, ya que esto les permite reevaluar el riesgo catastrófico de forma periódica (Swiss Re, 2011; Cummis, 2008).

Al igual que los demás tipos de bonos, los bonos CAT también son calificados por agencias, como son Standard & Poor, Fitch o Moody Ratings. Por lo general, los bonos corporativos se califican en base al riesgo de crédito, es decir, cuál es la probabilidad de que la empresa no cumpla con sus obligaciones y no sea capaz de pagar los cupones o de devolver el capital en el momento de vencimiento. Sin embargo, para los bonos catastróficos es muy importante tener en cuenta el riesgo de que ocurra un evento catastrófico que cause a los inversores la pérdida del capital invertido. Esta probabilidad de que ocurra cierto riesgo se calcula mediante los modelos de riesgo. La mayoría de los bonos CAT contienen calificaciones entre BB y B (Artemis, 2014).

También es importante remarcar que los bonos catastróficos cubren diferentes peligros en diferentes zonas geográficas, siendo el mercado estadounidense el que domina la oferta y demanda de bonos CAT, ergo es el país que emite e invierte más bonos catastróficos anualmente (Artemis, 2020). En la *Figura 2* podemos ver como también Suiza, Reino Unido y Francia son grandes inversores en el mercado de los bonos CAT. Dentro de la categoría “Otros”, se encuentran países como Japón, Canadá, Suecia o Alemania (Aon Securities LLC, 2020).

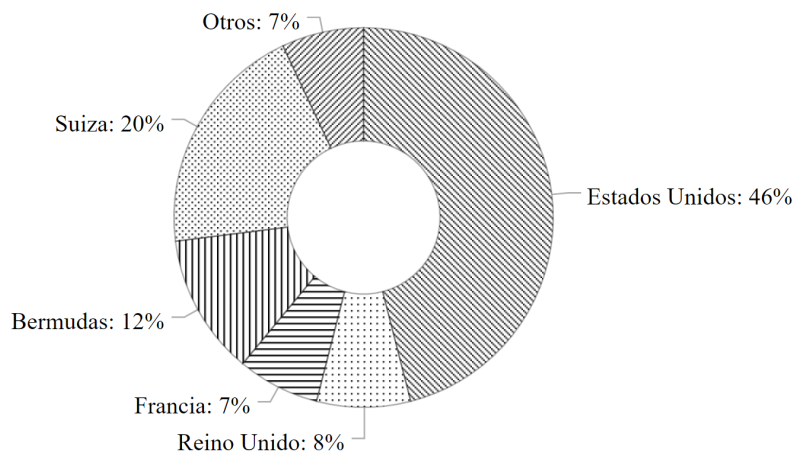


Figure 2: Inversores por países, 2020. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Aon Securities LLC)

Ejemplo práctico de un bono catastrófico

Consideremos que una aseguradora emite un bono CAT para cubrirse del riesgo de inundaciones, con una madurez de 3 años, un valor nominal de 100 euros y que paga un tipo de interés anual del 10%. Por tanto, los inversores compran este bono CAT por 100 euros, recibiendo a cambio 10 euros anuales, además de recuperar el principal al final del tercer año, siempre y cuando no ocurra ninguna inundación.

Pongamos que, con la emisión de este bono CAT, la aseguradora ha sido capaz de recaudar 100 mil euros, dinero que se depositará en una cuenta colateral, y que el bono está estructurado de forma que solo si las inundaciones causan unas pérdidas totales de más de 125 mil euros, se ejecutará el bono.

Por último, supongamos que durante el segundo año ocurren una serie de inundaciones que causan unas pérdidas de 150 mil euros. El bono CAT se activará y la aseguradora recibirá los 100 mil euros de la cuenta colateralizada, y usará dicho dinero para hacer frente a sus obligaciones de seguro. De esta forma, la aseguradora puede reducir sus costes de 150 mil a 50 mil euros, mientras que, por otro lado, los inversores habrán ganado 10 euros de los intereses que se pagaron durante el primer año, pero en el segundo año perderán el total del capital principal.

1.2.1 OTROS ILS

Los bonos catastróficos forman parte de la categoría de activos conocidos como “productos financieros relacionados con el seguro”, o “*Insurance Linked Securities*” (ILS). Estos instrumentos financieros tienen como objetivo cubrir la exposición al riesgo de las entidades aseguradoras cuando se produce una catástrofe de significativa gravedad. Los bonos catastróficos son el tipo dominante de ILS en circulación. Sin embargo, hay muchos otros tipos de ILS que no están relacionados con los eventos catástrofes, sino que están basados en las tasas de mortalidad o longevidad, entre otros.

A continuación, se muestran algunos de los tipos ILS más conocidos que existen en la actualidad (Boucher, 2009).

Titularización de seguros de vida

En inglés “*life insurance securitization*”. Mediante este instrumento las aseguradoras de vida pueden transferir el riesgo de longevidad y de mortalidad a los mercados de capital. Este tipo de instrumento financiero es clave para situaciones como las que estamos viviendo hoy en día, donde, debido a la pandemia provocada por el Covid-19, se producen picos en la mortalidad, lo cual afecta de forma negativa a la solvencia de las entidades aseguradoras (NAIC, 2020). No obstante, cabe destacar que, de acuerdo con Luca Tres, Socio de “Securis Investment Partners”, aunque el riesgo de mortalidad es un riesgo clave para las entidades aseguradoras, el Covid-19 no está teniendo un impacto significativo en el sector (Evans, 2020).

Pagarés vinculados al seguro hipotecario

Conocido en inglés como “*mortgage insurance linked notes*” (MILN). Desde su aparición en 2015 se han

convertido en una fuente importante de capacidad de reaseguro para las aseguradoras hipotecarias de Estados Unidos. En 5 años ha tenido una tasa de crecimiento anual de entorno al 117%. La principal ventaja de estos pagarés vinculados al seguro hipotecario es que son una forma de reaseguro del exceso de pérdidas, por lo que facilita a las aseguradoras hipotecarias la gestión del riesgo, permitiéndoles así reducir la cuantía de activos mínimos que deben tener a efectos de capital basado en el riesgo (Fitch Ratings, 2020).

Swaps de catástrofes

Este instrumento financiero se negocia en el mercado de derivados extrabursátiles (OTC). Las aseguradoras lo usan como herramienta para protegerse frente a las pérdidas potenciales derivadas de las catástrofes naturales, como un huracán o un terremoto. Además, este instrumento permite a las aseguradoras transferir ciertos riesgos que asumen mediante la emisión de pólizas y proporcionan una alternativa a la compra de reaseguros o a la emisión de los bonos catastróficos (Cummins, 2008).

Reaseguro colateralizado

El colateral, o garantía, lo aportan los inversores o un tercero, proporcionando así el capital necesario para poder cubrir la totalidad de las posibles reclamaciones que puedan ir surgiendo a lo largo de la vida del contrato de reaseguro. El colateral que hay que depositar debe ser equivalente al límite del contrato de reaseguro, menos las primas netas que se cobran. Este tipo de ILS permite que los fondos de pensiones, fondos de ILS, fondos de cobertura (“*hedge funds*”) y vehículos de reaseguro no calificados y capitalizados por terceros participen en programas de reaseguro, ya que estos contratos que suscriben están totalmente colateralizados/garantizados (Artemis, 2020).

De esta manera, estos inversores y proveedores de capital participan en actividades de reaseguro colateralizado, aportando capital para suscribir el riesgo (“*risk underwriting*”) de seguro sin necesidad de una calificación (“*rating*”), lo que les permite recibir las primas como un rendimiento del colateral invertido.

Sidecars

Tras el huracán Katrina, que tuvo lugar en 2005 en Estados Unidos, este tipo de ILS cobró importancia, puesto que es un instrumento que permite transferir el riesgo de una catástrofe a los inversores. Los *sidecars* son un vehículo de cometido especial, SPV, que permiten a las reaseguradoras ceder las primas de una cartera determinada de negocio a inversores que depositan fondos suficientes en el vehículo para garantizar el pago de todos los siniestros en el caso de que estos acontezcan. De esta manera, las reaseguradoras recurren a los *sidecars* tras acontecer un evento catastrófico grave para poder aumentar su capacidad de riesgo en los periodos de mayor tensión en el mercado (NAIC, 2020).

La principal diferencia que presentan los *sidecars* con respecto a los bonos CAT es que estos últimos son productos que cubren una gama muy amplia de riesgos, en diferentes zonas geográficas, durante un periodo de tiempo largo; mientras que los *sidecars* son instrumentos que se usan en momentos puntuales, por esta razón su duración está limitada al mercado duro o “*hard market*” (NAIC, 2020).

Se puede decir que la industria aseguradora se encuentra en un mercado duro, es decir, que se encuentra en un ciclo económico de contracción de la disponibilidad de seguros, cuando se cumplen las siguientes características (Marx, B., 2020): primas de seguro más elevadas, criterios de suscripción más estrictos, menor competencia entre las compañías de seguros y menor capacidad (las aseguradoras suscriben menos pólizas de seguros).

Si por el contrario, la industria asegurada presenta: primas de seguro bajas, coberturas más amplias, criterios de suscripción más relajados, mayor competencia entre las compañías de seguros y mayor capacidad (las aseguradoras suscriben más pólizas y hay límites más altos), entonces, esta industria se encuentra ante un mercado suave o “*soft market*”. La bajada en las primas de seguro afecta a la cuenta de resultados de las entidades aseguradoras, pues dependen de una combinación de los ingresos de las inversiones y las primas de los seguros para obtener beneficios (Marx, 2020).

Se puede concluir que, la característica clave que todos estos instrumentos financieros comparten es que sus rentabilidades no están relacionadas con el mercado financiero general. Esto resulta en un gran atractivo de los ILS, ofreciendo una alternativa al reaseguro tradicional, convirtiéndose en una herramienta clave que aseguradoras e inversores pueden usar para diversificar sus riesgos.

Por último, remarcar que, si bien hay gran variedad de instrumentos ILS, este trabajo se centrará en concreto en los bonos CAT.

1.2.2 MECANISMOS DE ACTIVACIÓN (TRIGGERS)

Uno de los elementos más importantes de los bonos catastróficos es determinar bajo qué condiciones estos se activarán y los inversores empezarán a sufrir pérdidas. Estos bonos usan unos **mecanismos de activación** o “*triggers*” con unos parámetros predefinidos específicos; así pues, cuando estos parámetros se cumplen, el bono se activa. Aunque existen una gran variedad de *triggers*, en este trabajo se estudian los cuatro mecanismos de activación más usados, los cuales ofrecen diferentes niveles de riesgo para los *sponsors* y diferentes niveles de transparencia para los inversores (Boyd J., 2011, Polacek A., 2018 y Swiss Re, 2011).

Activador de indemnización

Este método busca determinar las pérdidas reales a las que se enfrenta el sponsor (aseguradoras y reaseguradoras). Funcionan de forma similar al reaseguro tradicional, las pérdidas se determinarán en base a los riesgos que cubren y la zona geográfica, así como por supuesto el volumen y la cuantía de los contratos (Boyd, 2011; Polacek, 2018 y Swiss Re, 2011).

Activador de índices del sector

Para este activador, una compañía proporciona una estimación independiente de las pérdidas a las que el sponsor se enfrenta. En Estados Unidos, la empresa más conocida es Property Claim Services, líder en el servicio de índices para el mercado de los ILS; en Europa, la empresa líder es PERILS AG. Estas empresas recogen e informan de las pérdidas que sufren las entidades aseguradoras y reaseguradores tras un evento catastrófico. Para ello, no necesitan los datos reales de los *sponsors* sino que usan sus propias bases de datos para estimar la probabilidad de que un bono sea activado. Al proporcionar una estimación independiente y transparente se da una mayor seguridad a los inversores (Boyd, 2011; Polacek, 2018; Swiss Re, 2011).

En 2014 Property Claim Services publicó un artículo llamado “Five Index Trigger Benefits for Catastrophe Bond Sponsors”, donde se exponen las principales ventajas que tienen los activadores de índices del sector cuando se comparan con los activadores de indemnización. Entre dichas ventajas se encuentran:

- Mayor eficiencia: el activador por índice de sector es más fácil de estimar, puesto que usa un solo estimador, claro y conciso; mientras que, para los activadores por indemnización, es necesario recolectar información de diferentes fuentes, lo cual puede causar discrepancias.
- Sencillez del análisis: para los bonos con activadores por indemnización, los inversores deben entender de antemano las prácticas de los *sponsors* y obtener información sobre la exposición al riesgo de la cartera de suscripción del sponsor. Esto puede ser bastante difícil, sobre todo cuando se trata de riesgos comerciales complejos. Se crea así un coste de fricción por costes indirectos, como es el tiempo, esfuerzo e investigación. Sin embargo, para los activadores por índices del sector, los inversores no necesitan tener un conocimiento tan profundo del sponsor. Como consecuencia, muchos inversores prefieren bonos catastróficos con este tipo de activadores.
- Costes más bajos: cuando el bono CAT se activa, la liquidación es más rápida y suele causar menos disputas, lo cual se traduce en costes más bajos.
- Transparencia: mediante el activador por indemnización, el sponsor debe publicar información confidencial sobre su cartera de pólizas, si bien, con otros activadores, como el paramétrico o el de índice del sector, esto no es necesario.

Activador paramétrico

Se basa en mediciones de los parámetros de la catástrofe. Cuando un evento ocurre, se observa si se ha superado el umbral preestablecido del parámetro; de ser así, se activa la póliza de forma automática, y el pago al sponsor por parte de SPV se hará en unos pocos días. Así, por ejemplo, en caso de un terremoto, se tendrá en cuenta su magnitud por la escala Richter, o la velocidad del viento en caso de un huracán (Boyd, 2011; Polacek, 2018; Swiss Re, 2011).

Los parámetros que se usan son fácilmente medibles y se pueden comunicar de forma rápida. También es importante que ni el tomador del seguro ni los asegurados puedan influir en estos parámetros, pues se busca evitar el riesgo moral. Este activador se suele usar mayormente para los accidentes meteorológicos o accidentes naturales, como son los terremotos, inundaciones, ciclones, tifones, entre otros. Así, este activador se puede usar en muchos sectores: aviación, agricultura, construcción, transporte, etc. (Swiss Re, 2018);

Las principales ventajas de este tipo de activador se pueden resumir en:

- Proceso de pago sencillo y rápido: el activador por indemnizaciones requiere evaluar los costes reales de los siniestros, lo cual es bastante complejo y lleva mucho tiempo, puesto que a menudo se requiere la intervención de peritos; al contrario, mediante los activadores paramétricos el pago del bono se realiza en apenas unos días.
- Transparente y objetivo: el pago se basa en una serie de parámetros independientemente, que son verificables e imparciales. Además, esta información está disponible poco después de que ocurra el suceso, siendo la información fácil de comprender y verificar.
- Sencillo proceso de activación de los pagos: fácil de entender y que reduce los gastos relacionados con las reclamaciones.

Estos seguros paramétricos van unidos de la mano de los llamados “*smart contracts*”, donde un programa informático autoejecuta el contrato cuando una serie de condiciones preestablecidas se cumplen. Este tipo de contratos usan la tecnología “*blockchain*”, que garantiza la seguridad y la transparencia de estas transacciones. Esta tecnología es cada vez más popular y conocida gracias a que las criptomonedas, como Bitcoin, la usan (Sawla, 2018).

Si bien este tipo de activadores pueden revolucionar el mercado asegurador, también presentan una serie de desventajas. Una de las más significativas es que, si el evento no supera una serie de parámetros, el bono no se activa y la entidad aseguradora no recibe ningún pago. Sin embargo, esto no significa que no haya habido ninguna pérdida, por lo que la aseguradora sufrirá una pérdida económica (Swiss Re, 2018).

Activador de pérdida modelada

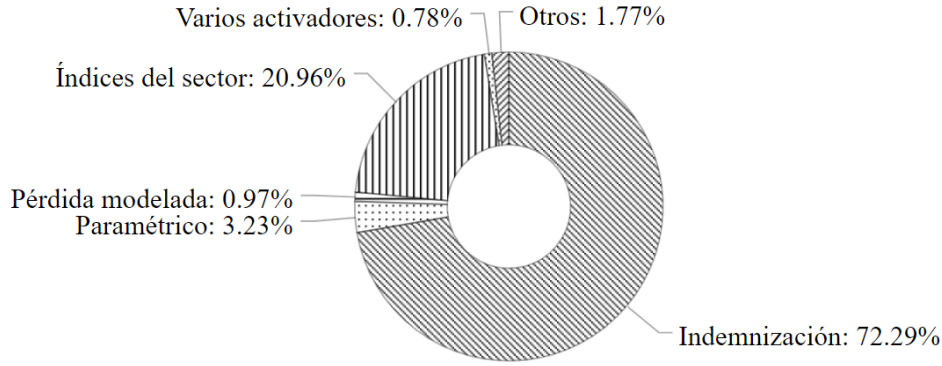
Es similar al activador paramétrico, usando los parámetros de una catástrofe, no obstante, estos se introducen en un modelo de terceros para estimar las pérdidas esperadas a las que el sponsor se tendrá que hacer frente; es decir, en vez de trabajar con los siniestros reales del sponsor, se construye una cartera para utilizarla con el software de modelización de catástrofes, que podrá ser similar o no a la cartera de exposición real del sponsor. De esta manera, cuando ocurre un evento catastrófico, los parámetros del mismo se contrastan con la base de datos de esta nueva cartera. Si las pérdidas modeladas superan un umbral determinado se ejecuta el bono. El modelo sobre el que se realizan estos cálculos debe de estar preespecificado en el contrato.

También cabe destacar que existen **activadores híbridos**, los cuales combinan diferentes mecanismos tradicionales de activación de los bonos. De esta forma, se busca reducir el riesgo de base y limitar el riesgo moral en la transacción.

Es difícil determinar si un activador es mejor que el otro, los *sponsors* deben buscar el activador que más se adecúe a sus estrategias de gestión del capital y del riesgo. Todos estos activadores son importantes y necesarios dado la gran variedad de riesgos catastróficos que los bonos CAT cubren. A la hora de elegir entre estos activadores, los *sponsors* deben tener en cuenta tres elementos clave: el **riesgo de base** (“*basis risk*”), el **riesgo moral** (“*moral hazard*”) y la transparencia hacia los inversores.

El riesgo de base es el riesgo que aparece ante la posibilidad de que, tras ocurrir un evento catastrófico, los bonos CAT solo sean activados parcialmente, o no sean activados en absoluto. Así pues, el sponsor sufrirá una pérdida al no recibir el capital necesario para cubrirlas. Al eliminar este riesgo se elimina la diferencia entre la cuantía de las pérdidas reales del sponsor y lo que cubre el bono CAT. A pesar de ello, eliminar este riesgo de base puede provocar un riesgo moral desde el punto de vista del inversor, ya que el sponsor puede ser menos cauto a la hora de resolver las reclamaciones o suscribir nuevas pólizas (Boyd, 2011).

En la *Figura 3* se puede observar cuáles son los tipos de activadores que fueron más utilizados en el pasado 2020, observando que el activador por indemnización es el más popular con diferencia entre el resto de los activadores.



Indemnización	32,573.8	Paramétrico	1,457.5	Pérdida modelada	435
Índices del sector	9,443.2	Varios activadores	350	Otros	798.1

Figure 3: Capital de riesgo de los bonos CAT por tipo de activación. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del directorio de transacciones de Artemis)

La información utilizada en la *Figura 3* se puede encontrar en el directorio de transacciones de Artemis, siendo esta la fuente de información más amplia que hay actualmente disponible sobre los bonos catastróficos, productos relacionados con los seguros (ILS) y otras formas alternativas de reaseguro, contando con información de más de 700 emisiones de bonos catastróficos.

La principal razón por la que las entidades aseguradoras prefieren usar el activador por indemnización es debido a que este garantiza al sponsor que se le pagarán las pérdidas reales a las que se tendrá que enfrentar, por lo que su estrategia de gestión de riesgos será más adecuada mediante este activador. Además, el activador por indemnización también suele ser el preferido de las aseguradoras, ya que elimina el riesgo de base.

Tampoco hay que olvidar que verificar las pérdidas reales lleva bastante tiempo, por lo que los bonos CAT no se podrán activar hasta que se verifique que el umbral establecido ha sido superado. Por ende, el sponsor tardará más tiempo en recibir el dinero. Normalmente, cuando se usa este método, los bonos CAT tardan en pagarse entre dos y tres años desde que ocurre el evento desencadenante. En contraste, cuando se usan activadores por índices del sector o activadores paramétricos, el tiempo estimado de pago de los bonos CAT es de tres meses (Polacek, 2018).

Por otro lado, las reaseguradoras tienden a usar más los activadores de índices del sector y paramétricos. Esto se debe a que las reaseguradoras, por lo general, no emiten pólizas de seguro, sino que asumen el riesgo de las pólizas suscritas por otras instituciones. Por tanto, deben esperar a que los suscriptores originales cuantifiquen sus pérdidas antes de poder cuantificar las suyas, lo cual puede retrasar los pagos. Además, las carteras de las reaseguradoras son mucho más amplias que las de las aseguradoras, al basarse en una selección mucho más amplia del sector. Así, su experiencia de pérdidas suele estar más correlacionada con las pérdidas del sector. Teniendo en consideración todos estos factores, los activadores de índice del sector y paramétricos se ajustan mejor a las características de las reaseguradoras, permitiendo evaluar las pérdidas de forma más rápida que los activadores por indemnización, además de que no se basan en las estimaciones de pérdidas de aseguradoras individuales (Cummis, 2008).

Por último, se observa que los inversores prefieren los activadores por índice del mercado, ya que reducen el problema del riesgo moral y maximizan la transparencia de las transacciones. Sin embargo, su nivel de riesgo de base suele ser más alto que con el resto de activadores.

En la siguiente gráfica se comparan de forma más visual estos cuatro activadores en base a tres elementos clave: transparencia, tiempo de respuesta y el riesgo de base. El objetivo es conseguir un equilibrio entre un riesgo de base bajo y un nivel de transparencia alto.

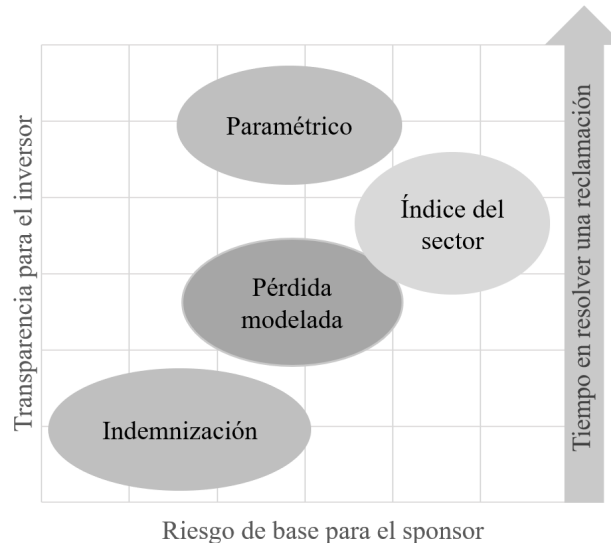


Figure 4: Comparación entre tipo de activadores. (Fuente: elaboración propia)

1.3 MERCADO PRIMARIO Y SECUNDARIO

Los bonos catastróficos se negocian tanto en el mercado financiero primario como en el secundario.

Es en el **mercado primario** donde los bonos son emitidos, con el objetivo de incrementar el capital de los *sponsors* para poder hacer frente a las potenciales reclamaciones por siniestros. De esta manera, es el sponsor el que determina el volumen del contrato. Los inversores compran estos bonos a través del SPV, pujando por ellos en una subasta. Esta puja se basa en el tamaño del cupón en vez de su precio, como suele ocurrir con la mayoría de tipos de bonos. Una vez que termina la subasta y el inversor compra el bono, el importe a pagar corresponde al porcentaje de participación en relación al tamaño total de dicho bono catastrófico. Por ende, el cupón que recibe el inversor se fija en base al importe suscrito (Jonsson, 2014).

Los inversores deben valorar el riesgo al que se enfrentan, cuál es la pérdida esperada, para así decidir cuál es el precio razonable a pagar por el bono catastrófico. Otro factor que los inversores deben tener en cuenta es la liquidez del bono, puesto que si hay pocos inversores interesados en un contrato, el tamaño de la prima puede incrementar.

Por otro lado se encuentra el **mercado secundario**. La mayoría de este tipo de bonos se suelen negociar en el mercado extrabursátil, OTC (*“over-the-counter”*), donde las dos partes interesadas negocian directamente, fuera del mercado organizado. En este mercado, los cupones de los bonos CAT son fijos y su precio variable, el cual se verá influenciado por diversos factores.

Uno de los factores clave son los meses del año, pues hay ciertas catástrofes naturales, como los huracanes o las inundaciones, que tienden a ocurrir en determinadas estaciones. En consecuencia, los inversores serán más reacios a comprar bonos, causando así una caída en el precio de este tipo de ILS. Otro factor determinante en el precio de un bono catastrófico es el hecho de si se ha producido o no el evento catastrófico determinado en el contrato, dado que, una vez que se ha producido dicho evento es prácticamente imposible vender el bono, al haber una alta incertidumbre sobre las pérdidas incurridas por el sponsor.

1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS FRENTE AL REASEGURO

Como se ha comentado anteriormente, una de las características más atractivas de este tipo de ILS es que operan independientemente de las limitaciones y variables del mercado financiero, lo que permite diversificar riesgos en un mercado. En 2012, Galeotti et al. llevaron a cabo una investigación donde no encontraron correlación ninguna entre el mercado de valores y el de los bonos CAT, si bien Dieckmann, en 2011, encontró una correlación entre ciertas variables del mercado de valores con los rendimientos de los bonos CAT.

Esto se debe a que cuando ocurre un evento catastrófico importante, como puede ser el huracán Katrina en Estados Unidos, toda la economía se ve afectada, influenciando al mercado de valores. De igual forma, cuando ocurre una crisis financiera que afecta al mercado de valores, debido a la aversión al riesgo de los inversores, los precios de los bonos catastróficos se ven influenciados. Así pues, generalmente la diversificación es una de las grandes ventajas de los bonos CAT, pero en ciertas ocasiones, el beneficio de la diversificación se puede anular, perjudicando a los inversores.

A quienes más benefician estos bonos son a los *sponsors* (aseguradoras y reaseguradoras), al ofrecerles una alternativa al reaseguro tradicional, reduciendo así sus costes de cubrir los riesgos catastróficos. También proporcionan capital a las entidades en los momentos que más lo necesitan, evitando así que tengan que declararse insolventes cuando acontece un evento catastrófico de gran envergadura.

Estos bonos CAT también son un gran atractivo para los inversores, puesto que proporcionan un mayor rendimiento que otros bonos de renta fija o acciones que ofrecen dividendos, debido a los competitivos cupones que ofrecen. Esto se debe a que, en el caso de que ocurra el evento catastrófico acordado, los inversores probablemente perderán si no todo, casi todo el capital invertido, aunque este riesgo se compensa con el corto periodo de vencimiento que tienen estos bonos CAT (Murphy C. B., 2020). Por último, indicar que la liquidez de este tipo de bonos es menor comparado con otros instrumentos del mercado financiero, pues la demanda de los bonos CAT no es tan alta (Kasi, 2020).

1.5 EVOLUCIÓN DEL MERCADO

En los últimos 20 años el mercado de bonos catastróficos ha pasado de ser una pequeña parte del panorama asegurador, a convertirse en una herramienta clave para la gestión de las pérdidas aseguradas para eventos catastróficos. En la *Figura 5*, se puede observar el volumen de capital en riesgo emitido cada año y el crecimiento del mercado desde la aparición de los primeros bonos CAT en 1997. Una vez que vencen los bonos, estos salen del mercado.

Desde el huracán Andrew de 1992, el cual impulsó la creación de los bonos catastróficos, este mercado ha crecido de tal manera que se ha convertido en una herramienta clave para que las aseguradoras y reaseguradoras se cubran ante los eventos catastróficos. Tres son los principales acontecimientos que han marcado el crecimiento de este mercado desde 1997 hasta hoy en día.

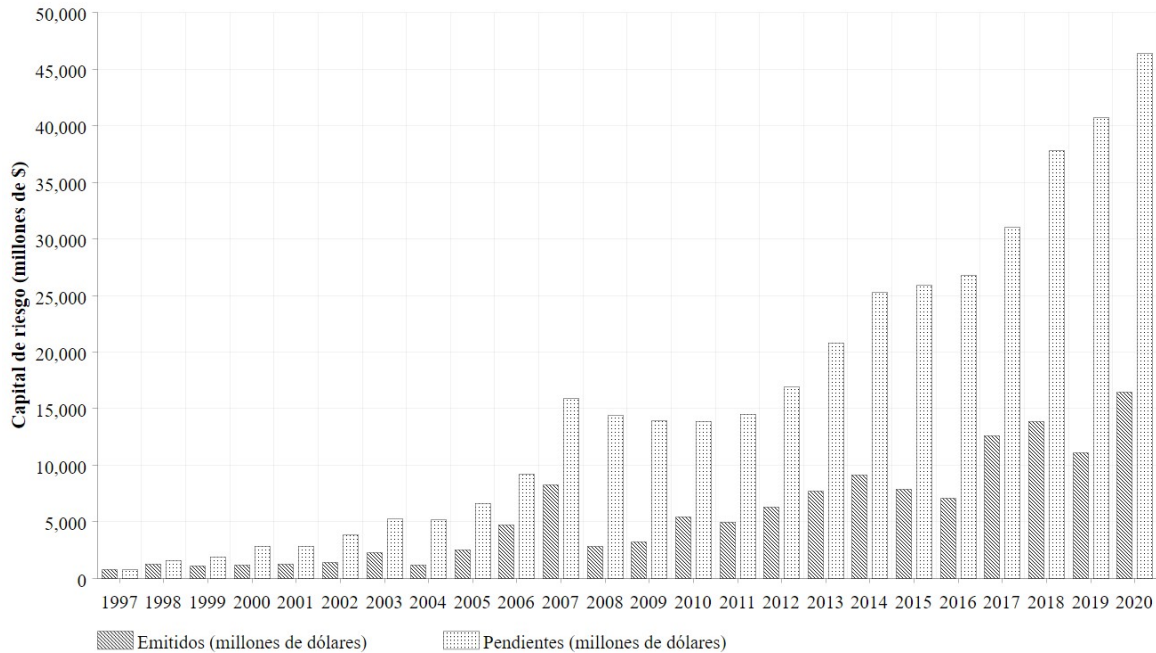


Figure 5: Bonos CAT emitidos e importe pendiente, 1997-2020. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del directorio de transacciones de Artemis)

En primer lugar, el huracán Katrina en 2005, el cual supuso un gran cambio en el mercado de los bonos CAT. Esta ha sido hasta la fecha una de las catástrofes naturales más costosas a nivel global, dejando a su paso unas pérdidas aseguradas estimadas en 62.000 millones de dólares. Tras este evento, los bonos CAT ganaron importancia, se empezaron a ver como una herramienta necesaria para la diversificación del riesgo. Así, este mercado pasó de mover una media de 1.200 millones de dólares anuales en 2005 a 4.700 millones de dólares en 2006, y 7.100 millones en 2007 (Artemis, 2021).

El segundo gran acontecimiento fue la crisis económica de 2008, donde el mercado de los ILS se vio afectado. Los inversores temieron que las estructuras colaterales de los bonos CAT estuvieran expuestas a un alto riesgo de crédito debido al colapso de Lehman Brothers. Esto causó que durante los años 2009 y 2010 se produjera una disminución en el total de la emisión de este tipo de bonos, hasta que se crearon estructuras más seguras que minimizaron el riesgo de contrapartida, devolviendo la confianza a los inversores (Hills, 2010).

Tras esta crisis económica, el mercado de ILS tuvo unos años de fuerte crecimiento. En 2020, se emitieron 16 millones de dólares, el triple que en 2010. Esto se debió principalmente a los bajos tipos de interés, claves para la entrada de capital no asegurador en el mercado de los bonos catastróficos. Debido a estos bajos tipos de interés ofrecidos por los bonos del Tesoro y otros bonos corporativos, muchos inversores institucionales vieron en el mercado de los ILS una buena oportunidad de obtener unos rendimientos superiores. Además,

gracias a las mejoras en la modelización de los bonos CAT, los *sponsors* empezaron a emitir más variedad de bonos, cubriendo una amplia gama de riesgos (Polacek, 2018).

Aún con la crisis que comenzó en marzo de 2020, debido al Covid-19, este mercado ha mostrado una gran resiliencia, tras una pequeña desaceleración después de ocurrir el primer brote de Covid-19, el mercado rápidamente se recuperó y cerró 2020 con los mejores resultados hasta la fecha, alcanzando un total de 16.436 millones de dólares en capital de riesgo de bonos catastróficos emitidos. Este mercado batió récords cuando el resto de mercados de capitales se vieron gravemente afectados debido a los estragos de la pandemia y la volatilidad que esta provocó. Siendo esto un indicador clave de que los bonos de catástrofe son una herramienta clave para el reaseguro y la transferencia de riesgos, puesto que se trata de un mercado con una baja correlación con el resto de mercados de capital (Gallin, 2020; Artemis, 2021).

En 2021, Fitch Ratings expuso varias de las razones que explicarían el crecimiento del mercado de los bonos catastróficos. Entre ellas se encuentra el hecho de que los bonos catastróficos han sufrido pocas pérdidas en los últimos años, comparado con otras estrategias de reaseguro colateralizado, lo que ha mantenido el interés de los inversores. Además, como indica Fitch Ratings, el diseño claro de algunos de los activadores o triggers que usan los bonos CAT ayudan a atraer a nuevos inversores y a mantener a los existentes (Evans, 2021).

Actualmente, el sector asegurador está trabajando para expandir los riesgos que cubren estos bonos CAT, buscando mejorar su modelización para así poder cubrir otros tipos de riesgos, como sería el riesgo por terrorismo o ciberataques. Por lo tanto, se puede concluir que este mercado seguirá teniendo un crecimiento más que positivo en el futuro, donde los bonos catastróficos asumirán un papel más importante para las aseguradoras y reaseguradoras, puesto que ya en los últimos años estos bonos se han convertido en una herramienta clave para la transferencia de riesgos (Gallin, 2020).

1.6 CAMBIO CLIMÁTICO

Otra de las razones clave por las que ha crecido tanto este mercado es debido a que en los últimos años los costes de los desastres naturales se han visto incrementados de forma significativa. En 1988, el Centro de Investigación sobre Epidemiología de las Catástrofes creó una base de datos de eventos de emergencia (EM-DAT), cuyo fin es proporcionar información sobre la ocurrencia de eventos catastróficos. Gracias a esta base de datos, se puede observar cuáles son los siniestros más costosos que han ocurrido en el mundo (Swiss Re, 2011). En la *Figura 6* se puede observar que, en las últimas décadas, las pérdidas aseguradas por catástrofes naturales se han visto incrementadas.

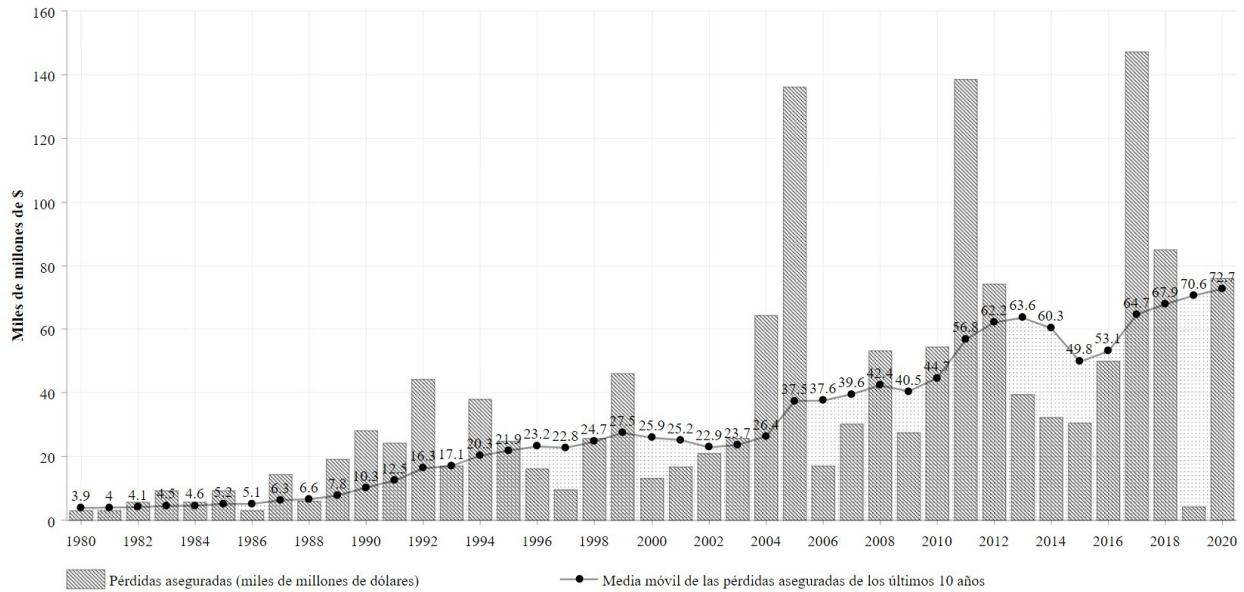


Figure 6: Pérdidas aseguradas por catástrofes naturales, 1980-2020. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del directorio de transacciones de Artemis)

Debido al cambio climático, se espera que estas cifras empeoren cada año, ya que cada vez se dan unas condiciones meteorológicas más extremas, debido principalmente a los altos niveles de contaminación, lo que propician que ocurran desastres naturales cada vez más graves. En 2020, las pérdidas por desastres naturales costaron a la industria aseguradora en torno a los 89 mil millones de dólares, lo cual supone un incremento del 40% con respecto a 2019, que cerró con un coste de 54 mil millones de dólares. Estas cifras inquietan cuando se comparan con los 8 mil millones de dólares de pérdidas causadas por el hombre (“*man-made*”) durante el año 2020. En total, las pérdidas totales ascienden 83 mil millones de dólares en 2020, siendo el quinto año más costoso desde 1970.

Todos estos datos fueron publicados en 2020 por la entidad Swiss Re, una de las principales proveedoras de seguros, reaseguros y otras formas de transferencia del riesgo basadas en seguros a nivel mundial. Cabe remarcar que “Swiss Re” informó que estas estimaciones de pérdidas por catástrofes no incluyen los siniestros relacionados con el Covid-19, dado que la evaluación de estos siniestros tardará más tiempo de lo normal en poder estimarse.

Gracias a los datos publicados por Swiss Re sobre los diferentes siniestros que afectan a las entidades aseguradoras, se puede ver que en 2020 los siniestros secundarios representaron un 70% de los siniestros asegurados por catástrofes naturales, siendo los incendios forestales y las tormentas severas las principales catástrofes acontecidas. Durante la última década, las tormentas severas, conocidas en inglés como “*convective storms*”, han causado más de la mitad de las pérdidas totales aseguradas por riesgos secundarios (Bevere, 2021).

Los **peligros primarios** (“*primary perils*”) se definen como aquellos siniestros que tienen un potencial de pérdidas mayor, por ende, están bien controlados y se suelen cubrir mediante modelos de catástrofes. Los principales riesgos primarios son los terremotos y los ciclones tropicales. Por otro lado, los **peligros secundarios** (“*secondary perils*”) son aquellos que generan pérdidas de menores cuantías. Entre ellos encontramos siniestros como las inundaciones, el granizo, las tormentas o los incendios forestales (Sinai, 2019).

Al estar los siniestros secundarios relacionados con la meteorología, el cambio climático afecta a los resultados de las pérdidas aseguradas. Dado que, a medida que las temperaturas se vuelven más extremas y cambia la humedad en el aire, se producen más tormentas y aparecen lluvias más extremas. Además, debido a las altas temperaturas, se produce un aumento de los siniestros por incendios forestales (Sinai, 2019).

Entre los peligros secundarios más graves de 2020 se pueden encontrar los incendios que ocurrieron en Australia, que quemaron en torno a 10 millones de hectáreas y que dejaron unas pérdidas aseguradas de más de 1.000 millones de dólares. También Canadá experimentó unas granizadas que dejaron 1.000 millones de dólares en pérdidas, siendo, hasta la fecha, el evento de granizo más caro del país. Tampoco podemos olvidar las inundaciones que ocurrieron en Yagtze, China, en mayo de 2020, cuyas pérdidas aseguradas ascendieron a 2 mil millones de dólares, o los graves incendios que ocurrieron en la primavera de 2020 en los estados de California, Washington y Oregon, en Estados Unidos, aunque sus pérdidas no fueron tan altas como los incendios forestales que tuvieron lugar en 2018 y 2017 (BBC News, 2020; Swiss Re, 2020).

Aunque los siniestros primarios también fueron significativos, concretamente en 2020, la temporada de huracanes del Atlántico Norte del año fue una de las más activas, a pesar de que las pérdidas no fueron tan altas; debido, principalmente, a que estos huracanes golpearon las zonas con más baja densidad de población y, por tanto, zonas donde no había grandes sumas de dinero aseguradas (Bevere, 2021).

Los factores subyacentes que influyen en los eventos de peligros primarios y secundarios son, en esencia, los mismos, donde podemos incluir eventos socioeconómicos y los efectos del cambio climático. Sin embargo, mientras que los riesgos primarios están bien controlados por el sector asegurador y reasegurador, los peligros secundarios lo están menos. Esto puede suponer un problema grave, pues como se ha mencionado anteriormente, en los últimos años se ha producido un crecimiento significativo de los peligros secundarios. Es por ello que el sector asegurador debe llevar a cabo una reestructuración para darle una mayor importancia a estos peligros (Bevere, 2021).

Dado que los riesgos tienen una naturaleza dinámica, es clave que el análisis de datos sea prospectivo en lugar de retrospectivo, para no subestimar la magnitud de las posibles pérdidas actuales y futuras. Para ello, la elaboración de modelos de riesgo también debe dejar de depender de las observaciones de datos históricos, que pueden no ser una buena representación de las condiciones actuales (Bevere, 2021).

1.7 PROGRAMA MULTICAT

Debido a los altos costes materiales que los eventos y accidentes catastróficos dejan a su paso, el sistema de seguros privados no es capaz de hacer frente estas contingencias de forma eficaz. Por ello, son muchos los gobiernos que se ven responsables de cubrir estos costes ante la incapacidad financiera de las entidades aseguradoras, como en el caso del accidente nuclear de Fukushima, en 2011, donde las principales pérdidas fueron cubiertas por el Gobierno de Japón.

Sin embargo, los recursos disponibles de los gobiernos suelen ser insuficientes y requieren unas reservas demasiado altas que son complicadas de mantener. Además, en los países menos desarrollados o en vías de desarrollo, donde hay una menor densidad y penetración de los seguros, la carga financiera resultante de los eventos catastróficos puede llegar a ser demasiado alta (Shao, 2015).

Con este problema en mente, en 2009 el Banco Mundial lanzó un programa llamado MultiCat, una plataforma de emisión de bonos para catástrofes naturales que permite a los gobiernos y otras entidades públicas a acceder a los mercados internacionales de capital para cubrirse ante los eventos catastróficos (Multicat Program - The World Bank, 2009).

Esta plataforma pionera está enfocada principalmente a ayudar a los países en vías de desarrollo a acceder a coberturas de seguros asequibles para múltiples riesgos y regiones a través de los mercados de capital. Así pues, mejora las condiciones de acceso a la cobertura para que los gobiernos y otros organismos públicos puedan gestionar mejor el riesgo de catástrofe, disminuyendo su impacto financiero y económico. En consecuencia, uno de los principales objetivos del Banco Mundial es lograr unos costes asequibles y eficientes para sus clientes, reduciendo los costes de transacción (Multicat Program - The World Bank, 2009).

Se trata además de un programa flexible, donde incluye gran variedad de estructuras para la agrupación de diferentes riesgos, aprovechando así la diversificación. Entre las catástrofes naturales que se pueden asegurar se encuentran terremotos, inundaciones, tormentas y huracanes, entre otros (Multicat Program- The World Bank, 2009).

México fue el primer país en usar este programa en octubre de 2009. Debido a la localización geográfica de este país, México, es vulnerable a numerosos riesgos naturales. En 1985, dos terremotos de magnitudes 8 y 7.5 terminaron con la vida de 10.000 personas y derribaron más de 100.000 viviendas a lo largo del país. En el pasado, cuando ocurrían este tipo de siniestros, el Gobierno mexicano se veía obligado a desviar recursos presupuestarios para ayudar con la reconstrucción (Mexico MutiCat Bond - GFDRR, 2013).

Así pues, para evitar este problema, en 1996 el Gobierno creó un fondo para catástrofes naturales, denominado FONDEN. De esta manera, se creó un fondo presupuestario para el socorro en caso de que ocurra un evento catastrófico. En 2006, FONDEN emitió un bono catastrófico de 160 millones de dólares para transferir el riesgo sísmico de México a los mercados internacionales de capitales, convirtiéndose así en el primer bono CAT emitido por un Estado. Este bono fue denominado **CatMex** (Mexico MutiCat Bond - GFDRR, 2013).

Tras el vencimiento de este CatMex en 2009, México decidió diversificar aún más su cobertura agrupando múltiples riesgos en múltiples regiones, emitiendo un bono CAT con el recién creado Programa MultiCat del Banco Mundial, el cual permite cubrir varios riesgos en varias áreas geográficas con bajos costes. Este bono tenía un vencimiento de tres años, por lo que en 2012 emitieron otro bono catastrófico por un total de 315 millones de dólares, que cubre dos regiones adicionales, sumando así un total de 5 regiones (Mexico MutiCat Bond - GFDRR, 2013).

Gracias a estos bonos, México transfirió un *pool* o consorcio de riesgo de catástrofe por primera vez al mercado financiero, reduciendo así la presión sobre los presupuestos públicos, pues ahora pueden asegurar la financiación de los costes antes de que se produzca el evento catastrófico. Esto supone un ejemplo clave para otros países emergentes, siendo una muestra de que, mediante los bonos catastróficos, se puede evitar la necesidad de tener que acumular excesivas reservas presupuestarias para protegerse ante futuros desastres naturales (Mexico MutiCat Bond - GFDRR, 2013).

CAPÍTULO II: ENERGÍA NUCLEAR

2.1 INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la población y de la economía mundial, unido a la rápida urbanización, crea un aumento en la demanda de la energía. En los últimos años la cantidad de personas sin acceso a la electricidad ha caído significativamente, solo un 11% de la población no tiene acceso. Esto crea nuevos desafíos, puesto que se busca satisfacer esta nueva demanda sin aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero que afectan al medioambiente (Nuclear Energy and Sustainable Development- World Nuclear Association, 2020).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó en 2020 que alrededor de siete millones de personas mueren de forma prematura debido a la contaminación del aire, siendo una de las principales causas de esta contaminación las fuentes industriales para la generación de energía (Nuclear Energy and Sustainable Development- World Nuclear Association, 2020). Es por esta razón que es clave impulsar energías limpias que permitan un desarrollo sostenible, es decir que se pueda satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de satisfacer las necesidades de las generaciones futuras.

Hay una clara necesidad de cambiar la forma en la que se genera la electricidad, tanto para satisfacer la nueva demanda de los países en vías de desarrollo como para dejar de usar los combustibles fósiles, principalmente el carbón, el cual es altamente contaminante. A pesar de los intentos de fomentar el uso de fuentes renovables de energía, en los últimos 10 años apenas ha habido cambios significativos, como se puede observar en la *Figura 7*. En la actualidad, alrededor del 60% de la generación de electricidad procede de combustibles fósiles, como el carbón, petróleo y gases como el gas natural; del 40% restante, un 20% es energía nuclear y el otro 20% es de fuentes de energía renovables (EIA, 2021).

En 2019, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) de la OCDE, publicó un informe donde se argumentaba que la energía nuclear es un sistema energético limpio. A diferencia de los combustibles tradicionales fósiles, como puede ser el carbón, la energía nuclear no produce emisiones de efecto invernadero como el metano o el CO_2 . La energía nuclear es la segunda mayor fuente de producción de electricidad con bajas emisiones de carbono, después de la energía hidroeléctrica.

Aunque las plantas nucleares son caras de construir, una ventaja de este tipo de energía es que el funcionamiento de una central nuclear es más barato que el de otras fuentes de energía, como el carbón o el gas, incluso cuando se tienen en cuenta otros gastos como el de la gestión y eliminación de residuos radiactivos. Se estima que las centrales son entre un 50% y 66% más baratas de mantener que una central de carbón, y entre un 80% y un 85% más baratas que las centrales de gas (Unwin, 2019).

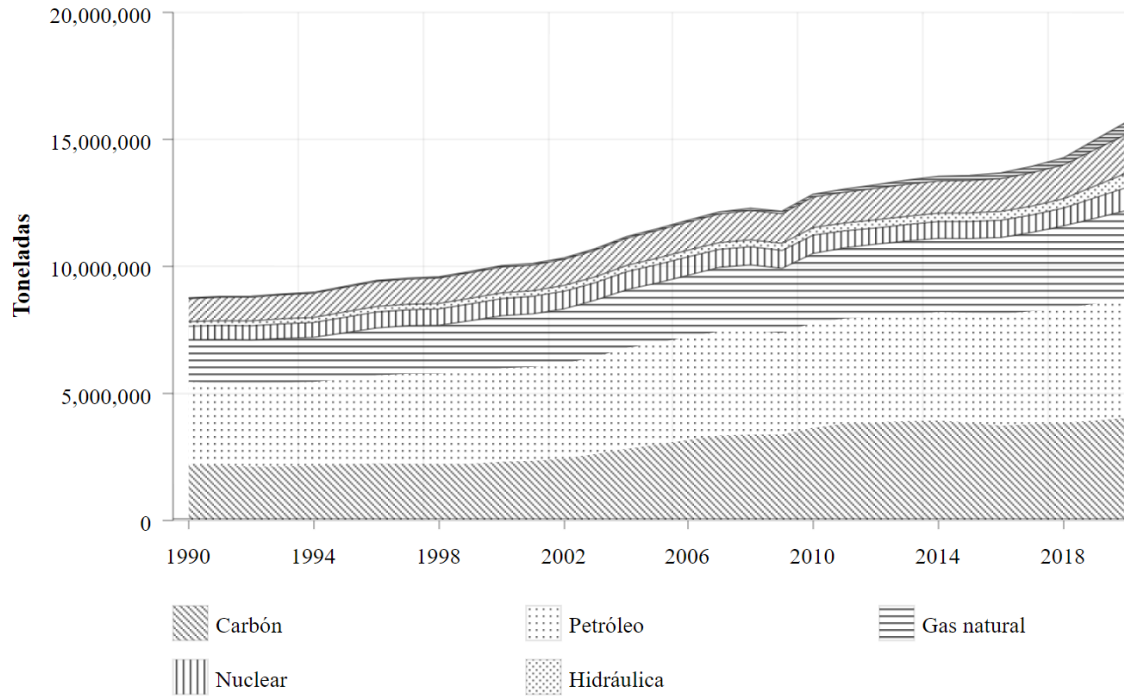


Figure 7: Producción mundial de electricidad por fuentes, 1990-2020. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de IEA)

El Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) estima que, para sustituir una central nuclear de 1GW (gigavatio), se necesitarían 2GW de carbón, y entre 3GW y 4GW de otras fuentes renovables para poder generar la misma cantidad de energía (Unwin, 2019). Así, esta energía es clave para los países en vías de desarrollo, pues para conseguir una industria fuerte, y continuar su desarrollo económico, es necesario que estos países tengan un suministro de electricidad disponible las 24 horas del día, los 7 días de la semana.

Por todas estas razones, se le quiere dar un papel más importante a la energía nuclear. Es en los países en vías de desarrollo donde la energía nuclear está creciendo a un ritmo más rápido; gran parte de este crecimiento se está produciendo y se producirá en China e India. Se espera que China supere en 2023 a EEUU en la cantidad de energía nuclear que genera, aunque otros países como Emiratos Árabes, Turquía y Bangladesh están construyendo sus primeros reactores, así como otros muchos países en África, para poder así cubrir sus crecientes necesidades de electricidad (World Energy Needs and Nuclear Power - World Nuclear News, 2020).

El suministro mundial de electricidad generado por plantas nucleares está liderado por EEUU, Francia y China, siendo 31 los países del mundo que tienen centrales nucleares operativas, como se puede ver en la *Figura 8*. Aunque gracias a las redes de transmisión regionales, muchos más países usan energía generada por la energía nuclear, como por ejemplo Italia y Dinamarca, que importan esta energía, la cual representa en torno a un 10% de la electricidad total que consumen.

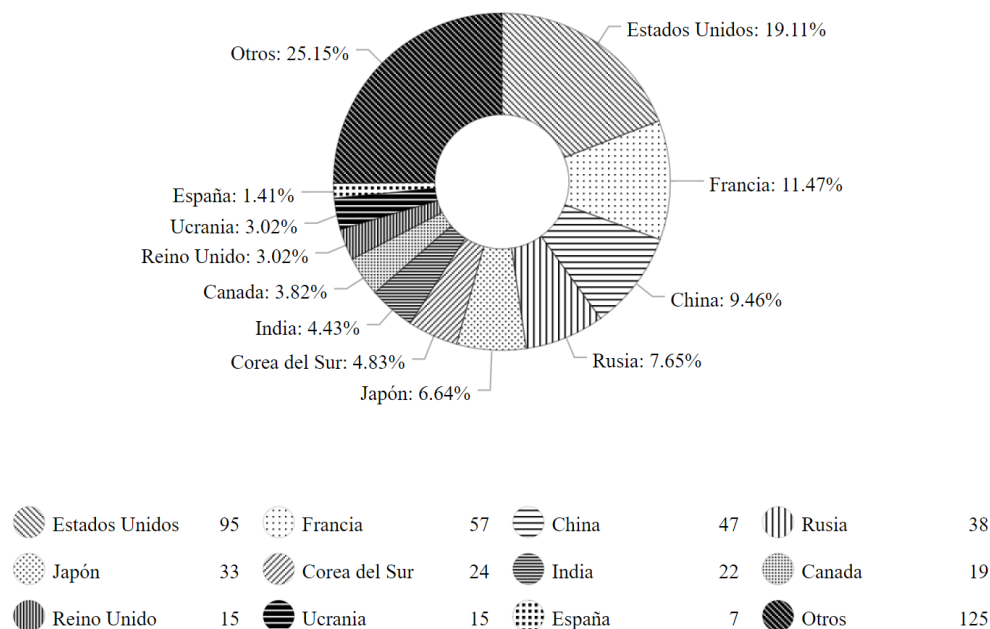


Figure 8: Plantas nucleares por países. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Statista)

Es en estos países, con economías más desarrolladas, fundamentalmente Europa y Norte América, donde se están llevando a cabo políticas que apuestan más por otro tipo de energías y buscan acabar con la energía nuclear. Esto se debe principalmente a las presiones de la población a cerrar las centrales nucleares por el potencial peligro que presentan y a los riesgos asociados con los residuos radioactivos (Nuclear Energy and Sustainable Development - World Nuclear Association, 2020; IEA, 2019).

Hoy en día, en España solo se encuentran 5 centrales nucleares en activo, con un total de siete reactores, sin embargo, han llegado a haber en España hasta 17 centrales nucleares. Hasta el 2011 había una moratoria por la que se prohibía la construcción de nuevas centrales nucleares. Aunque, en 2011 el Senado, debido al cambio climático, aprueba la Ley de Economía Sostenible, por la que se amplía la vida útil de las centrales nucleares más allá de 50 años, siempre y cuando así lo apruebe el Consejo de Seguridad Nuclear (Méndez, 2011).

2.2 PRINCIPALES USOS

El uso de la energía nuclear proporciona una energía limpia y además asequible para los países en vías de desarrollo. No obstante, la tecnología nuclear no solo se usa para el suministro de energía con bajas emisiones, sino que tiene múltiples aplicaciones, fundamentales y que tienen una importante presencia en nuestra vida cotidiana. Entre las aplicaciones más conocidas encontramos la medicina o agricultura, pero hay muchas otras. A continuación, se muestran varias de las aplicaciones más relevantes de la tecnología nuclear (The Many Uses of Nuclear Technology- World Nuclear Association, 2021):

- Radioisótopos: alrededor 220 reactores localizados en más de 50 países se usan para la investigación y formación, donde muchos de ellos se usan para producir isótopos médicos e industriales.
- Agricultura: las semillas se exponen a radiación para provocar mutaciones para reforzar y acelerar el proceso natural de mutación genética espontánea. Estas mutaciones además requieren menos fertilizantes e insecticidas.
- Fertilizantes: También se pueden usar los isótopos anteriormente mencionados en la agricultura, pues permiten determinar qué cantidades de fertilizante hay que usar en cada planta. De esta manera, se hace una mejor gestión de los fertilizantes que, de no ser usados correctamente, dañan el medio ambiente.
- Insecticidas: mediante la radiación se puede controlar la población de insectos gracias a la esterilización mediante radiación.
- Comida: la tecnología nuclear también se usa para irradiar alimentos para eliminar bacterias que pueden transmitir enfermedades. Más de 60 países tienen normas que obligan el uso de la irradiación para los productos alimentarios.
- Medicina: el uso de las radiaciones y los radioisótopos en la medicina es cada vez más extendido. En los países desarrollados, cada año una de cada cincuenta personas usa la medicina nuclear para el diagnóstico de enfermedades. También se usa para la terapia y el tratamiento de diversos tipos de afecciones médicas.
- Transporte: este tipo de energía es especialmente útil para los buques que se encuentran largos periodos de tiempo en el mar sin posibilidad de repostar. También se usa la energía nuclear para submarinos, rompehielos y portaaviones. Asimismo, la misión espacial de Galileo a Júpiter y la de New Horizon a Plutón usaron generadores térmicos radioisótopos, puesto que por el calor que generan por la desintegración de las fuentes radiactivas, normalmente plutonio-238, se genera más electricidad que con paneles solares.

- **Industria:** la energía nuclear también es usada en la industria con diferentes propósitos. Se usa para la desalinización del agua, para explosiones nucleares con fines de ingeniería civil y como fuente de calor para diversas aplicaciones como la producción y refinado del petróleo, entre otros. Además, a través de las sondas nucleares se puede llegar a determinar la química y la física de los suelos.

Todas estas aplicaciones ya tienen una gran importancia en nuestras vidas, y en el futuro se espera que cobren aún más relevancia gracias a las numerosas investigaciones que se realizan para aumentar las posibilidades que brinda esta tecnología. Una de las investigaciones más relevantes hoy en día es la fusión nuclear que, a diferencia de la fisión nuclear, método tradicional usado por las centrales nucleares, busca unir los núcleos de los átomos en vez de separarlos (Guías Jurídicas, 2021). Es este segundo método de fusión nuclear, que en los últimos años está siendo estudiado y desarrollado.

Precisamente es en China donde, en mayo de 2021, el reactor Tokamak llegó a alcanzar una temperatura de 120 millones de grados centígrados en el plasma. Este “Sol artificial” es uno de los proyectos que buscan crear reactores de fusión, siendo esta la manera en la que el Sol genera electricidad. Así pues, se podrá generar energía limpia, libre de CO_2 , además de producir una cantidad mucho más limitada de residuos radiactivos, por lo que promete ser una energía segura y económica. Podrá generar asimismo energía de forma ilimitada, proporcionándola bajo demanda, siempre que sea necesaria. Esto supone una gran ventaja respecto a las energías renovables, las cuales son intermitentes (Pastor, 2021).

Siguiendo esta línea, para 2025 se espera concluir la construcción de un reactor termonuclear experimental ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) en la localidad francesa de Adarache. Este proyecto ha sido financiado y liderado por EUROfusion, consorcio de instituciones nacionales de investigación pertenecientes a la Unión Europea, cuyo principal objetivo es demostrar que mediante la fusión de hidrógeno se puede crear y controlar energía (Europapress, 2021).

EUROfusion, formado por 28 países, ha acordado localizar uno de los cinco Centros de Computación Avanzada en Barcelona, España. Este centro, llamado “Supercomputing Center - Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS)”, comenzará a funcionar en julio de 2021, cuyos científicos experimentales ayudarán a acelerar la llegada de la energía de fusión (La Vanguardia, 2021).

También en Culham, Inglaterra, se espera que para 2025 se finalice la construcción de una planta de demostración de fusión nuclear, financiada por el fundador de Amazon, Jeff Bezos. Esta instalación no tiene fines comerciales, si no de investigación. Como el caso de la planta de Tokamak en China, e ITER, en Francia, esta planta busca estudiar el proceso de fusión (McGrath, 2021).

Estados Unidos tampoco se queda atrás, Bill Gates, fundador de Microsoft, junto con Warren Buffet, multimillonario inversor, comenzarán la construcción en Wyoming, Estados Unidos, de una central nuclear de Natrium, cuyos reactores nucleares son más seguros que los de las tradicionales centrales nucleares. Este proyecto cuenta con una inversión de más de mil millones de dólares y se prevé que abastecerá de electricidad a unos 400 mil hogares. Buscan también así potenciar la energía nuclear como un tipo de energía limpia y respetuosa con el medio ambiente (Pilot Natrium plant to be built in Wyoming - World Nuclear News, 2021; El Economista, 2021).

2.3. PELIGROS

Aunque son muchos los usos y los beneficios que nos brinda la energía nuclear, no podemos olvidar los peligros que este tipo de energía trae consigo; a pesar de que desde su descubrimiento nos ha otorgado muchas comodidades, también ha provocado grandes tragedias.

En la *Figura 9* se observa que los costes materiales de los accidentes nucleares superan a los de otro tipo de fuentes de energía. Pese a todo, la energía nuclear es una de las energías que menos accidentes graves causa al año, principalmente si se compara con combustibles fósiles, como el gas y el petróleo, como se puede ver en la *Figura 10*.

ENERGÍAS	Países pertenecientes a la OCDE		Países no pertenecientes a la OCDE	
	Accidentes	Fatalidades	Accidentes	Fatalidades
Carbón	87	2259	1604	33974
Petróleo	187	3492	358	19516
Gas Natural	109	1258	78	1556
Hidro	1	14	12	30007
Nuclear	0	0	1	31
Biocombustible	0	0	0	0
Biogás	0	0	2	18
Geotérmica	0	0	1	21

Figure 9: Accidentes graves a partir de 5 fatalidades, diferenciados por tipo de energía, 1970-2008. (Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos de Burgherr et al., 2010)

Cuando pensamos en los peligros de la energía nuclear solemos pensar en los accidentes de Chernóbil o Fukushima, sin embargo, hay muchos otros accidentes que pueden ocurrir en una central nuclear. De acuerdo con el International Nuclear Event Scale (INES), los eventos catastróficos se pueden clasificar en 7 niveles.

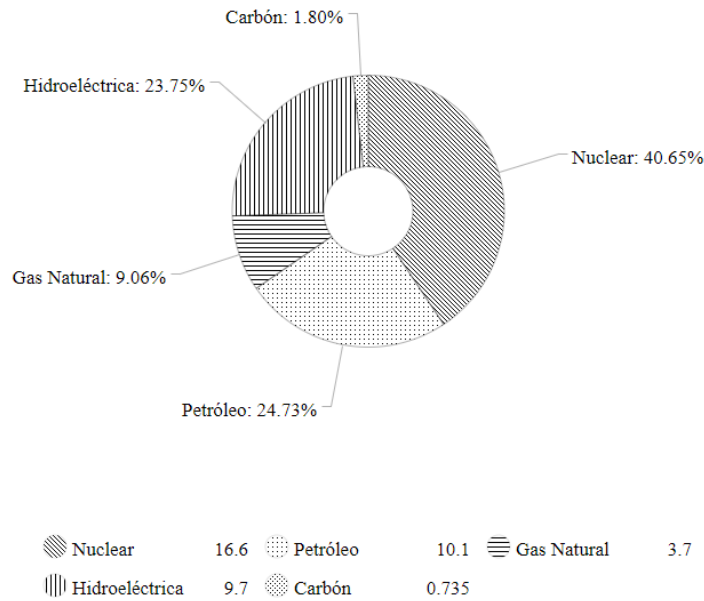


Figure 10: Daños materiales por accidentes causados por fuentes de energía, expresado en miles de millones de dólares, 1970-2007. (Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos de Sovacool et al, 2008)

Esta escala es logarítmica, por lo que la gravedad de un evento es alrededor de 10 veces mayor por cada aumento que hay de nivel. Para considerar la gravedad de un evento se considera tanto en el impacto que tiene sobre las personas como en el medio ambiente, además del impacto en las barreras y el control radiológico, y en la defensa en profundidad.

Los niveles del 1 al 3 son incidentes, que engloban, entre otros, huelgas o fallos en los sistemas de seguridad. Del nivel 4 al 6 son accidentes, que incluyen aquellos sucesos que tienen un impacto tanto dentro como fuera de la planta nuclear, como por ejemplo, el fallo de una de las máquinas principales o el vertido de material radioactivo. Por último, el nivel 7 engloba accidentes graves, como el fallo de un reactor nuclear, el cual tiene efectos adversos en el medio ambiente y en la salud de los habitantes. Un ejemplo claro de un accidente de nivel 7 sería el desastre nuclear de Fukushima, que se produjo en marzo de 2011, o el de Chernóbil, en 1986.

Para determinar a qué nivel pertenece cada incidente o accidente nuclear se siguen una serie de pautas: los efectos dentro de las instalaciones, los efectos fuera de las instalaciones, y la defensa en la degradación de profundidad. En la *Figura 12* se especifican estos criterios a seguir. Remarcar que esta calificación no es lo suficientemente precisa, por lo que en ocasiones es difícil determinar en qué nivel en concreto se debe situar cada incidente o accidente.

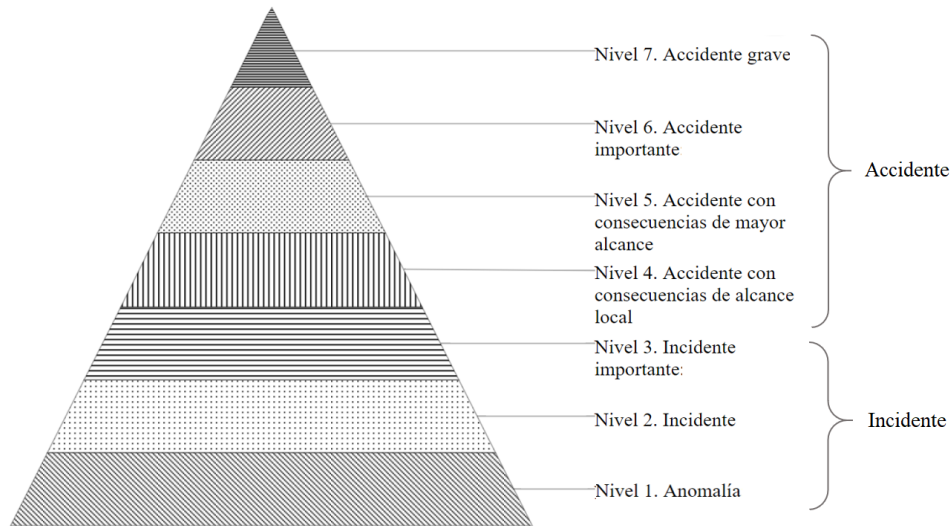


Figure 11: Representación piramidal de la escala INES. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INES)

También se observa que una de las principales preocupaciones relacionadas con este tipo de energía es la creación de residuos radiactivos. Debido a que estos materiales son altamente peligrosos ya que aún son radiactivos, pudiendo afectar al medio ambiente y a la salud de los humanos incluso durante miles de años. Aunque la normativa dicta cómo se deben manipular, transportar, almacenar y eliminar este tipo de residuos para evitar accidentes, en ocasiones estos ocurren (Consejo de Seguridad Nacional).

Los residuos radiactivos siguen una clasificación donde se separa entre residuos de alta y baja actividad, puesto que la radiactividad de estos residuos puede variar desde niveles que no son casi dañinos a residuos como el uranio, que son altamente peligrosos. Normalmente, los residuos se suelen almacenar temporalmente antes de eliminarse, al reducirse la radiación de estos residuos con el tiempo y, de esta manera, se reducen las posibles dosis de radiación que reciben los trabajadores que transportan y manipulan estos residuos. Los componentes del combustible que se usan para poner en funcionamiento los reactores también son altamente radiactivos, por lo que deben ser manejados con cautela (Consejo de Seguridad Nacional).

A la hora de cerrar una central nuclear, también se debe de seguir un detallado proceso para dismantelar los reactores y todo el equipo que se ha vuelto radiactivos, además de haber unas normas estrictas que rigen el dismantelamiento de las centrales nucleares, que implican la limpieza de los sistemas y estructuras de las centrales contaminadas radiactivamente y la eliminación del combustible radiactivo (Consejo de Seguridad Nacional).

Como se puede ver, son muchos los riesgos que las centrales nucleares traen consigo, pues, a pesar de que hay un estricto protocolo para evitar los accidentes, es inevitable que estos ocurran.

	IMPACTO		
	Personas y medio ambiente	Barreras radiológicas y control	Defensa en profundidad
NIVEL 7	- Liberación grave de material radiactivo con efectos en la salud y el medio ambiente; requiere la aplicación de contramedidas.		
NIVEL 6	-Liberación grave de material radiactivo, probablemente requiera la aplicación de contramedidas.		
NIVEL 5	- Liberación grave de material radiactivo, probablemente requiera la aplicación de algunas contramedidas. - Varias muertes por radiación.	- Daños graves en el núcleo del reactor. - Liberación grave de material radiactivo dentro de una instalación, provocando una alta probabilidad de exposición al público; puede derivar en un accidente grave o un incendio.	
NIVEL 4	- Liberación menor de material radiactivo, no es necesario la aplicación de contramedidas, salvo los controles alimentarios locales. - Al menos una muerte por radiación.	- Daños en el combustible que dan lugar a una liberación superior al 0,1% del inventario del núcleo. - Liberación de cantidades significativas de material radiactivo dentro de una instalación; provocando una alta probabilidad de exposición significativa del público.	
NIVEL 3	- Exposición diez veces superior al límite anual reglamentario para los trabajadores. - Efectos no letales de la radiación.	- Exposición de más de 1 Sv/h en la zona de trabajo. - Contaminación grave de una zona no diseñada para ello, con probabilidad baja de que afecte al público.	- Casi accidente en una central nuclear. - Pérdida o robo de una fuente radioactiva sellada. - Entrega errónea de una fuente radioactiva sellada, sin procedimientos adecuados para manejarla.
NIVEL 2	- Exposición a un miembro del público superior a 10mSv. - Exposición de un trabajador por encima del límites anual reglamentarios.	- Niveles de radiación en un área de operación de más de 50 mSv/h. - Contaminación significativa dentro de la instalación en una zona no diseñada para ello.	- Fallos significativos en la seguridad, pero sin consecuencias reales. - Embalaje inadecuado de una fuente radioactiva sellada.
NIVEL 1			- Sobreexposición a un miembro del público por encima del límite anual reglamentarios. - Problemas menores en los componentes de seguridad con una defensa significativa restante. - Pérdida o robo de una fuente de baja radioactividad.

Figure 12: Descripción general de los niveles INES. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INES)

A continuación, se presentan siete de los accidentes nucleares más importantes de la historia, empezando por aquellos accidentes clasificados con magnitudes más bajas en la escala del INES (Nabalia Energía, 2018):

1. Accidente de Tokaimura: en 1999, una planta de reciclaje de combustible nuclear 2 personas murieron y más de 49 sufrieron daños de diferentes gravedades. Esto fue debido a una negligencia laboral, que causó que numerosas personas estuvieran expuestas a la radioactividad. Este accidente fue clasificado con una magnitud de nivel 4 en la escala del INES.
2. Accidente radiológico de Goiania: ocurrió en Brasil, en septiembre de 1987. Una fuente radioactiva médica, que ya no se encontraba en uso, fue robada de un hospital abandonado. Este accidente se cobró la vida de 4 personas y 249 sufrieron consecuencias a causa de la radioactividad. Tuvo una magnitud, según la escala del INES, de nivel 5.
3. Incendio de Windscale: tuvo lugar en octubre de 1957, en una instalación nuclear de fines militares localizada en Inglaterra. Debido a este incendio se emitieron grandes cantidades de productos radiactivos al exterior. Este accidente tuvo una magnitud de nivel 5 según la escala del INES.
4. Accidente de Three Mile Island: ocurrió en Estados Unidos, en marzo de 1979. Una central nuclear localizada al noreste del país tuvo una fuga de gases de altos niveles de radioactividad. También este accidente tuvo una magnitud de nivel 5 en la escala del INES.
5. Accidente de Kyshtym: tuvo lugar en septiembre de 1957, en una planta de producción de plutonio en Rusia. Este accidente tuvo una magnitud de nivel 6 y ocasionó una alta contaminación radiológica por todo el río Obs que llegó hasta el Océano Ártico.
6. Accidente de Chernóbil: no podemos completar esta lista sin incluir este accidente, considerado como uno de los mayores desastres medioambientales y que alcanzó el máximo nivel de la escala del INES. Este accidente tuvo lugar en abril de 1986, en Ucrania, donde uno de los reactores sufrió un sobrecalentamiento. Este accidente costó la vida a dos personas, aunque posteriormente morirían 29 más debido a la radiación.
7. Accidente de Fukushima I: tras el terremoto y el tsunami que tuvieron lugar en marzo de 2011 en Japón, ocurrieron varias explosiones en los reactores nucleares, lo que causó otro de los accidentes más graves hasta ahora vistos. Tuvo una valoración de nivel 7 de magnitud en la escala del INES.

Más recientemente, en este año 2021, varias preocupantes noticias han ocupado titulares. El 13 de abril de 2021, Japón aprobó un plan para liberar al mar un millón de toneladas de agua contaminada, abriendo un agitado debate internacional, al haberse usado esta agua durante los últimos años para enfriar los reactores, cuyos sistemas de enfriamiento fueron dañados durante el accidente de Fukushima (BBC, 2021).

Aunque IAEA (International Atomic Energy Agency) defiende este plan, argumentando que es similar a cualquier otra liberación de aguas residuales que realizan plantas por todo el mundo, tanto Corea del Sur como China y el grupo medioambiental Greenpeace, se encuentran en total oposición con este plan. Si bien esta agua ha sido sometida a un tratamiento para eliminar la mayor parte de la radioactividad, esta aún contiene elementos dañinos, como es el tritio. A pesar de que la radiación de tritio solo es dañina si se consume en grandes cantidades, su radiación puede ser ingerida a través de los peces (BBC, 2021).

También recientemente, en junio de 2021, la compañía francesa Framatome advirtió que China estaba subiendo los límites detectables de radiación para así evitar tener que cerrar la central nuclear de Taishan, ya que algunas barras de uno de los reactores se dañaron, causando una liberación controlada de gases. Sin embargo, hay discrepancias sobre si la seguridad de la central está garantizada o no (Perfil, 2021).

Aunque se han enumerado los accidentes nucleares más notorios que se han producido hasta la fecha, en la *Figura 13* se pueden observar los quince accidentes más costosos en la historia de la energía nuclear. Cabe también mencionar que las instalaciones nucleares requieren inversiones millonarias para su correcta construcción y mantenimiento, por lo que al ocurrir un accidente nuclear grave estas instalaciones suelen quedar inservibles. Por tanto, estos costes también son un factor clave a tener en cuenta.

LUGAR		AÑO	COSTE (Miles de Millones de \$)
Chernobyl	Ucrania	1986	259
Fukushima	Japón	2011	166
Tsuruga	Japón	1995	15.5
Three Mile Island	Pensilvania, EEUU	1979	11
Beloyarsk	Rusia	1977	3.5
Sellafield	Reino Unido	1969	2.5
Athens	Alabama, EEUU	1985	2.1
Jaslovske Bohunice	Eslovaquia	1977	2
Sellafield	Reino Unido	1968	1.9
Sellafield	Reino Unido	1971	1.3
Plymouth	Massachusetts, EEUU	1986	1.2
Chapelcross	Reino Unido	1967	1.1
Chernobyl	Ucrania	1982	1.1
Pickering	Canadá	1983	1
Sellafield	Reino Unido	1973	1

Figure 13: Los 15 accidentes nucleares más costosos. (Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos de Sovacool et al., 2017)

Tras tener en cuenta el grave impacto humano y material que puede llegar a tener un accidente nuclear, nos llegamos a replantear si todas las ventajas que nos aporta la tecnología nuclear compensan los riesgos.

En España también han ocurrido accidentes nucleares, aunque si bien no fueron tan graves como para ser clasificados como nivel 7 en la escala del INES, algunos de ellos son importantes de mencionar debido a su relevancia. En la central nuclear de Ascó, en Tarragona, se liberaron sin control partículas que eran altamente radiactivas a la atmósfera. Esto ocurrió entre noviembre de 2007 y enero de 2008, durante todo este tiempo la central intentó ocultar este problema, por lo que se desconoce la cantidad exacta de material radiactivo que fue liberado (Accidentes - Greenpeace, 2017).

También en Tarragona, en la central nuclear de Vandellós I, en 1989, se produjo un incendio cuando la instalación se encontraba en pleno funcionamiento. A consecuencia del mismo, uno de los reactores sufrió un sobrecalentamiento que estuvo a punto de acabar en una grave catástrofe, por fortuna pudieron apagar el incendio a tiempo. Tras este incidente hubo un gran revuelo mediático, donde tras una lucha social se acabó por cerrar esta central nuclear.

Aunque España está clasificada como un país con riesgo sísmico “bajo”, varios han sido los terremotos que han obtenido una clasificación alta en la escala sismológica de Richter, como se puede ver en la *Figura 14* (Instituto Geográfico Nacional, 2021). Por esta razón, a la hora de decidir el emplazamiento de las centrales nucleares, se consideran los riesgos sísmicos, además de seguir una normativa de seguridad diseñada para evitar accidentes debido a terremotos y otros fenómenos naturales que puedan acontecer. No obstante, estas medidas no son suficientes, pues muchas centrales nucleares en España, como la de Cofrentes, Ascó, Almaráz o Santa María de Garoña, no son capaces de resistir un terremoto con una aceleración horizontal de 0.3g (Justicia Climática - Amigos de la Tierra, 2011).

La aceleración sísmica es una medida popular utilizada para los terremotos. A diferencia de la escala Richter o la escala de magnitud de momento, esta no mide la energía total que liberó el terremoto, por lo que es una medida de intensidad y no de magnitud. Esta medida se suele usar en la ingeniería para establecer normativas a la hora de la construcción de infraestructuras y edificaciones (Carazo, N. 2012).

En el caso de la central nuclear de Almaráz y de Ascó, además, no hay un sistema que monitorice los terremotos, por lo que hay un alto riesgo de un terremoto cause una inundación por la rotura en una de las presas que se encuentran río arriba, lo cual causaría un corte en el suministro eléctrico causando graves problemas. De igual forma, la central nuclear de Trillo, en caso de terremoto, es vulnerable a una inundación interna, que causaría graves problemas debido a la falta de medidas que hay para reducir las cantidades de hidrógeno explosivo que se encuentran en el reactor (Justicia Climática - Amigos de la Tierra, 2011). Se puede concluir así que las centrales nucleares españolas no están diseñadas para soportar terremotos de altas magnitudes, lo cual supone un grave problema.

Fecha	Magnitud	Localización
2015	5,2 g	Ossa de Montiel (Albacete)
2011	3,7 g	Lorca (R. de Murcia)
2007	5,1 g	Pedro Muñoz (Ciudad Real)
2006	4,1 g	Escopete (Guadalajara)

Figure 14: Aceleración vertical de terremotos en el territorio español. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos del INE)

Varios movimientos sísmicos se han localizado cerca de las centrales nucleares de Zorita y de Trillo, localizadas en la provincia de Guadalajara, aunque no se han detectado daños, hay un claro problema de seguridad. También se han detectado seísmos en la zona de Cuenca, donde se había decidido construir un almacén temporal centralizado (ATC) para residuos nucleares, el cual fue muy polémico por no realizar un estudio detallado sobre la sismología de la zona. Actualmente este proyecto se encuentra paralizado debido a que los técnicos del Consejo de Seguridad Nuclear pusieron en duda la idoneidad de estos suelos, decidiendo finalmente suspender la tramitación de los permisos en 2018 (Cadena Ser, 2018).

Por todo ello, muchas organizaciones medioambientales, como la CEAN, Coordinadora Estatal Antinuclear, abogan por cerrar progresivamente las plantas nucleares, ya que consideran que la energía nuclear es insegura, insostenible y prescindible (Justicia Climática - Amigos de la Tierra, 2011). En las últimas décadas la energía nuclear ha ido perdiendo cada vez más peso en España. En los periodos de mayor auge, un 50% de la electricidad que se consumía en España era producida mediante energía nuclear; hoy en día solo representa un 20%. El Gobierno poco a poco ha ido apostando por cerrar las centrales nucleares que tuvieran una vida superior a los 40 años (Cadena Ser, 2018).

2.4 LEGISLACIÓN

Desde que las primeras centrales nucleares empezaron a abrir, el uso de este tipo de energía ha sido controvertido. En España, el ejército empieza a llevar a cabo los primeros estudios e investigaciones durante el régimen franquista, y en 1969 abre la primera central nuclear en España, situada junto al río Tajo en Almonacid de Zorita, provincia de Guadalajara. Con la aparición de este nuevo tipo de energía se empiezan a plantear nuevos problemas.

Debido a que los riesgos nucleares tienen el potencial de ser riesgos catastróficos, pues los daños a la salud de las personas y al medio ambiente pueden ser muy graves y duraderos en el tiempo, es necesario crear un nuevo régimen jurídico que regule la materia nuclear.

Dado que las medidas preventivas de seguridad no pueden eliminar en absoluto el riesgo de utilizar tecnología nuclear, se considera necesario establecer una serie de normas que garanticen la protección financiera al público, pero a su misma vez, que la industria nuclear no estuviera expuesta a una excesiva carga de responsabilidad por el riesgo de poder verse acosadas por excesivos pleitos judiciales (Boulanenkov et al., 1988).

La primera legislación que se promulgó fue en Estados Unidos, en 1957, con la **Ley Price-Anderson**, y posteriormente a nivel internacional surgió en Europa el **Convenio de París sobre Responsabilidad Civil por Energía Nuclear** de 29 de julio de 1960, firmado por la mayoría de los países de la actual OCDE, y el **Convenio de Bruselas** de 31 de enero de 1963 (Boulanenkov et al., 1988). Cabe destacar que la elaboración de estos convenios fue gracias a los estudios de la organización del Centro de Estudios del Riesgo Atómico (CERA) (MITECO- Responsabilidad civil por daños nucleares, 2021).

El régimen jurídico internacional de la responsabilidad civil por daños nucleares, establecido en la **Convención de Viena sobre Responsabilidad Civil por Daños Nucleares**, en 1977, se refleja en gran medida en el **Convenio de París sobre Responsabilidad Civil en Materia de Energía Nuclear**, depositado en la Secretaría General de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Sin embargo, las Partes Contratantes del Convenio de París no son Partes de la Convención de Viena y viceversa. Los objetivos de estos regímenes son claros: por un lado buscan proteger a las víctimas de los accidentes nucleares garantizando la obtención de una indemnización equitativa y rápida, y por otro lado buscan proteger a la industria nuclear, conformada por la explotación, fabricación y transporte, de las incertidumbres respecto las responsabilidades a las que hacen frente conforme al derecho consuetudinario (Boulanenkov et al., 1988).

Los fundamentos de estos dos regímenes son comunes y se mantienen hasta nuestros días (Boulanenkov V. y Brads B., 1988):

- Responsabilidad estricta del explotador: para facilitar los litigios a las víctimas de las reclamaciones se determina que el explotador de la instalación nuclear es el único responsable ante los incidentes que ocurran en ella. Los proveedores así quedan libres de responsabilidad, aunque ellos hayan sido los causantes del accidente.

- Limitación de la responsabilidad: se limitan los importes a los que son responsables los explotadores de las instalaciones nucleares. También se limita el tiempo. Más adelante se explica este asunto en más profundidad.
- Garantía financiera obligatoria: los exportadores están obligados a cubrir sus responsabilidades mediante seguros o garantías financieras.
- No discriminación: no se puede discriminar en base a la nacionalidad o domicilio a las víctimas.

Aunque el Convenio de París y el de Viena tienen los mismos fundamentos, las Partes Contratantes de ambos no eran las mismas. En un principio se esperaba que los países que habían firmado el Convenio de París también se adhiriesen al de Viena, pero esto no llegó a ocurrir, ocasionando una serie de problemas. Al estar aplicando ambos Convenios pueden surgir conflictos jurídicos, pues ambas normativas se pueden aplicar en el caso de que ocurra un incidente nuclear en el territorio de la parte contratante que estuviera bajo el otro Convenio. Así nació el **Protocolo Común**, que tiene como objetivo armonizar las legislaciones nacionales, estableciendo unas regulaciones mínimas para proporcionar una protección y seguridad financiera contra los accidentes causados por la energía nuclear. Se eliminan así los conflictos que puedan surgir de la aplicación simultánea de ambas Convenciones a un mismo incidente nuclear (IAEA, 2021).

Por otro lado, se encuentra el **Convenio de Bruselas**, del 31 de enero de 1963, depositado en la Secretaría General de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), complementa el Convenio de París sobre responsabilidad civil en materia de energía nuclear. Su principal objetivo es aportar fondos públicos en el caso de que las cantidades aportadas por los operadores sean insuficientes. Establece una garantía de cobro en tres tramos de responsabilidad, cuyas cantidades, mostradas en la *Figura 15*, se actualizaron en su última modificación de febrero de 2004 (MITECO - Responsabilidad civil por daños nucleares, 2021).

Así pues, el primer tramo de responsabilidad corre a cargo de los operadores de las instalaciones nucleares; el segundo tramo corre a cargo tanto los operadores como de los fondos públicos del Estado; y el último y tercer tramo corre a cargo de todas las Partes Contratantes del Convenio, los cuales se reparten equitativamente los costes en base a su capacidad nuclear instalada y su PIB (MITECO - Responsabilidad civil por daños nucleares, 2021).

Tramo	Convenio Vigente	Modificación
1º Responsabilidad del operador	150 millones DEG*	700 millones €
2º Fondos públicos del Estado del operador	150-175 millones DEG	700-1200 millones €
3º Fondos públicos de todas las partes contratantes	175-300 millones DEG, cada Estado aporta 50% en función de su capacidad nuclear instalada centrales y 50% de su PNB	1200-1500 millones €, cada Estado aporta 35% en función de su Producto nacional bruto (PNB) y 65% de su capacidad nuclear instalada

* DEG, *Derechos Especiales de Giro. Unidad de cuenta del Fondo Monetario Internacional, variable y calculado según una bolsa de las unidades de cuenta más utilizadas*

Figure 15: Tramos de responsabilidad del Convenio de París. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de MITECO)

Llama la atención de la *Figura 15*, que la industria nuclear sólo sea responsable de la indemnización por los daños causados hasta un máximo de 700 millones de euros, sobre todo tras estudiar los graves accidentes que las instalaciones nucleares pueden llegar a provocar, como se ve en la *Figura 13*. Estas cantidades se encuentran lejos de ser suficientes, es por ello que Greenpeace, ONG ambientalista internacional, demanda a los gobiernos que la cuantía de indemnizaciones por responsabilidad nuclear no sea limitada.

España es una de las Partes Contratantes en el Convenio de Bruselas, donde ha ratificado las modificaciones de 2004, y en Convenio de París, pero no en Parte Contratante en el Convenio de Viena. También es parte del Convenio Conjunto, el cual España firmó, pero no ha ratificado hasta la actualidad. En la *Figura 16* podemos ver, a nivel internacional, que países son Partes Contratantes en los diferentes Convenios previamente mencionados.

El 28 de mayo se publicó en el Boletín Oficial del Estado español la Ley 12/2011, de 27 de mayo, de responsabilidad civil por daños nucleares y producidos por materiales radiactivos, cuyo principal objetivo es regular esta materia en los márgenes de actuación que los Convenios de París y Bruselas dan a los Estados Miembros (MITECO - Responsabilidad civil por daños nucleares, 2021).

A continuación, se exponen otras normas que regulan la materia nuclear a nivel español dignas de mención. Primero de todo mencionar que, en materia de autoridad, el artículo 149 de la Constitución española asigna autoridad al Estado en esta materia de energía nuclear. Otros estándares de referencia clave son los siguientes:

Países	Convenciones	Países	Convenciones
Argentina	CV; CVR; CIS; (CP)	Lituania	CV; CVR; CC; (CIS)
Armenia	CV;	México	CV
Bélgica	CP; CSB; (CPR); (RCSB); (CP)	Holanda	CP; CSB; CC; (CPR); (RCSB)
Brasil	CV	Pakistán	
Bulgaria	CV; CP	Rumanía	CV; CC; CVR; CIS
Canada	CIS	Rusia	CV
China		Eslovaquia	CV; CC
República Checa	CV; CC; (CIS); (CPR)	Emiratos Árabes	CVR; CC; CIS
Finlandia	CP; CSB; CC; (CPR); (RCSB)	Sudáfrica	
Francia	CP; CSB; CC; (CPR); (RCSB)	Eslovenia	CP; CSB; CC; (CPR); (RCSB)
Alemania	CP; CSB; CC; (CPR); (RCSB)	Suecia	CP; CSB; CC; (CPR); (RCSB)
Hungría	CV; CC	Suiza	CP; CPR; CSB; RCSB; (CC)
India	CIS	Ucrania	CV; CC; (CVR); (CIS)
Japón	CIS	Reino Unido	CP; CSB; (CPR); (RCSB); (CV); (CC)
Kazakhstan	CV, CVR	EEUU	CIS

CP = Convenio de París (CP); CPR = Convenio de París revisado (2004), aún no está en vigor.

CSB = Convenio Suplementario de Bruselas; CSBR = Convenio Suplementario de Bruselas Revisado (2004), aún no en vigor.

CV = Convención de Viena; CVR = Convención de Viena revisada (1997), en vigor desde 2003

CC = Convenio Conjunto (1988)

CIS = Convención sobre Indemnización Suplementaria, en vigor desde 2015.

() = firmada pero aún no ratificada.

Figure 16: Países y Convenios donde son Partes Contratantes. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de World Nuclear Association)

- **Ley 25/1964, de 29 de abril:** como se indica en el artículo 1 a) “*La presente ley tiene por objeto establecer el régimen jurídico para el desarrollo y puesta en práctica de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear y de las radiaciones ionizantes en España, de manera que se proteja adecuadamente a personas, cosas y medio ambiente*”. Esta Ley de Energía Nuclear regula la explotación de los depósitos de minerales radiactivos, así como también los permisos de funcionamiento de las instalaciones nucleares. Esta fue la primera ley sobre energía nuclear que crea un principio de responsabilidad objetivo para el caso de que acontezcan accidentes nucleares, donde también clasifica las conductas que se consideran infracciones.

También cabe mencionar a la Empresa Nacional de Seguros Radiactivos (ENRESA), esta forma parte del servicio público responsable de la gestión de residuos y el desmantelamiento de centrales nucleares. El artículo 38 bis de la Ley N^o 25/1964, de 29 de abril, establece que “*La gestión de los residuos radiactivos, incluido el combustible nuclear gastado, y el desmantelamiento y clausura de las instalaciones nucleares, constituye un servicio público esencial que se reserva a la titularidad del Estado, de conformidad con el artículo 128.2 de la Constitución Española*”. Esta Ley también encomienda a ENRESA la gestión de este servicio público de acuerdo con el Plan General de Residuos Radiactivos aprobado por el Gobierno.

- **Ley 15/1980, de 22 de abril:** esta ley crea el Consejo de Seguridad Nuclear, el cual es un Organismo de Derecho Público, con una personalidad jurídica y patrimonio propio. Es independiente de la Administración General del Estado y tiene competencia en protección radiológica y seguridad nuclear. El objetivo principal de este Consejo es regular el funcionamiento de todas las instalaciones nucleares localizadas en el territorio español, además de proponer nuevas regulaciones y normativas con el objetivo de proteger la seguridad de los ciudadanos y el medio ambiente. También cuenta con la potestad de tramitar expedientes sancionadores.
- **Real Decreto 1952/2000, de 1 de diciembre:** regula el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), creado en 1980 con el objetivo de desarrollar proyectos en donde se aplica la energía nuclear. Según el artículo 1 de este Real Decreto 1952/2000, de 1 de diciembre, el CIEMAT es un organismo público de investigación con carácter de organismo autónomo. Además, según el artículo 2 *“el CIEMAT tiene por finalidad la promoción y desarrollo de actividades de investigación básica, investigación aplicada, innovación y desarrollo tecnológicos, con especial atención al ámbito energético y medioambiental, contribuyendo al desarrollo de procesos industriales más eficientes, con las restricciones inherentes a la preservación de la salud humana y a la conservación del medio ambiente”*.
- **Ley 12/2011, de 27 de mayo:** cuyo objetivo, según el artículo 1, es *“establecer un régimen específico de responsabilidad civil por daños causados por accidentes que provoquen la emisión de radiaciones ionizantes que pudieran producirse en el manejo, almacenamiento y transporte de materiales radiactivos que no sean sustancias nucleares”*.
- **Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero:** según el artículo 1, tiene como objeto *“la regulación de la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos cuando procedan de actividades civiles, en todas sus etapas, desde la generación hasta el almacenamiento definitivo, con el fin de evitar imponer a las futuras generaciones cargas indebidas, así como la regulación de algunos aspectos relativos a la financiación de estas actividades, dando cumplimiento al marco comunitario”*.

A modo de resumen, se pueden determinar que los detalles más significativos de la Ley española son los siguientes (MITECO - Responsabilidad civil por daños nucleares, 2021):

- Su ámbito de aplicación incluye instalaciones y materiales nucleares que también están sujetos al Convenio de París, así como determinados materiales radiactivos detallados en el anexo legal, aunque en este último caso solo se aplica a los daños que se produzcan dentro del territorio del país.

- En cuanto al límite de responsabilidad, la ley determina una diferencia entre los daños que son causados por los Estados Miembros de los Convenios de Bruselas y París, para los cuales se establece un límite de responsabilidad del titular de 1.200 millones de euros, y los demás casos del ámbito de aplicación territorial, que se contemplan en el Convenio de París, donde se establece un límite de 700 millones de euros, aplicando los respectivos principios de reciprocidad.
- Con respecto al límite temporal, la Ley establece que el límite de tiempo para las reclamaciones por lesiones personales es de 30 años (calculado a partir del accidente), y 10 años para otros daños causados por accidentes nucleares. Asimismo, se estableció un plazo de prescripción de tres años, a partir del momento en que el perjudicado conoció la fecha del daño y al responsable del daño y presentó una demanda ante el tribunal.
- Para la responsabilidad por daños ocasionados durante el transporte de materiales nucleares, se realiza una remisión general a las disposiciones del Convenio de París.
- Respecto a la forma en la que se garantiza la responsabilidad del explotador, se establece que el dueño de las instalaciones tiene la obligación de contratar una póliza de seguros u otra garantía financiera con una entidad que debe de estar previamente autorizada por el Ministerio de Economía y Hacienda.
- Se determina en la Ley que el Estado cubrirá los daños causados por un accidente nuclear para aquellos casos donde se aplique el tercer tramo indicado en el Convenio de Bruselas, o cuando los daños personales superen el límite establecido de responsabilidad del explotador.
- Indicar también que la Ley española creó una nueva Ley para regular la responsabilidad que tienen los explotadores de las instalaciones radiactivas cuando ocurren daños o accidentes dentro del país, ya sean causados dentro de las instalaciones o durante el transporte. Se gradúan así las cantidades de cobertura obligatoria en función de la actividad de dichos materiales.

2.5 COBERTURA

2.5.1 ASEGURADORAS

La aparición de los primeros programas de energía nuclear civil puso en una tesitura a las entidades aseguradoras, las cuales debían poder dar cobertura a los posibles accidentes que estas pudieran causar. Ya que, aunque la frecuencia de los siniestros es baja, su potencial podría ser catastrófico.

Es por ello que muchas entidades de seguros no están dispuestas a cubrir los riesgos nucleares, creando una brecha entre la necesidad social y la capacidad de los seguros de hacer frente a las catástrofes industriales, al tener las aseguradoras una capacidad financiera limitada. Aunque hay una exhaustiva legislación que asegura que las entidades aseguradoras pueden hacer frente a todos los siniestros que puedan surgir, en el caso de los seguros industriales aparecen dos grandes problemas.

El primer problema es que las catástrofes industriales de gran envergadura son consideradas riesgos no actuariales. Esto se debe a que las entidades aseguradoras tienen la exigencia de poder hacer frente a todas sus obligaciones adquiridas mediante los contratos de seguro, pero, por lo general, los accidentes industriales suelen ser incalculables, como es el caso de los riesgos nucleares. Esto supone un problema para las aseguradoras, que calculan las primas en relación al riesgo asumido, teniendo en cuenta la frecuencia y severidad del riesgo, pero para realizar estos cálculos se necesitan que se cumplan dos condiciones (Faure y Van DenBergh, 1995; Wetterstein, 1990; Tyran y Zweifel, 1993).

La primera condición es disponer de suficientes datos empíricos para poder determinar la pérdida esperada del riesgo asumido, es decir, la probabilidad de que ocurra un siniestro asegurado multiplicado por la magnitud de dicho daño. Esta condición no se cumple para los seguros industriales, puesto que hay una falta de datos. Por ello, las aseguradoras suelen recurrir a profesionales, como ingenieros físicos, pero estas estimaciones no son igualmente fiables, dejando un alto nivel de incertidumbre. Esta sería la primera razón por la que este tipo de riesgos no se considera como actuarial.

La segunda condición es que se cumpla ley de los grandes números, la cual estipula que cuanto mayor es el número de riesgos similares, pero no correlacionados, que cubre una aseguradora, más se acercará el coste total de los daños a la probabilidad subyacente. Esta segunda condición tampoco se cumple, el número de siniestros similares es bajo, por ende, la ley de los grandes números no se puede aplicar y los riesgos que se cubren no se pueden considerar como actuariales, pues no se puede determinar con certeza qué cantidad de capital es necesario tener en las reservas para hacer frente a cada riesgo.

Por tanto podemos concluir que, al no cumplirse ninguna de estas dos condiciones, los riesgos industriales, y en concreto los nucleares, no se pueden valorar con certeza y tampoco se podrán calcular las primas.

El segundo problema que presentan los riesgos industriales para las centrales nucleares es que las entidades aseguradoras no tienen la capacidad financiera de cubrir siniestros de grandes magnitudes, que pueden causar pérdidas potencialmente millonarias. Es esta misma premisa por la cual nacieron los bonos CAT, tras las grandes pérdidas que dejó el huracán Andrew en Estados Unidos y la falta de fondos de las entidades aseguradoras para hacer frente a estas pérdidas (Radetzki et al., 2000).

Como se explicó en el apartado “2.4. Legislación”, la fuerte regulación legislativa del sector asegurador garantiza que las entidades aseguradoras y reaseguradoras tengan la capacidad de hacer frente a todos los siniestros que puedan ocurrir. No obstante, no hay ninguna norma que imponga que no se puedan asegurar grandes sumas de dinero en un determinado riesgo mientras que la aseguradora tenga el capital suficiente en sus reservas para poder hacer frente al mismo. Es por ello que las entidades aseguradoras son libres de poder realizar contratos para la cobertura de riesgos de gran envergadura, como es el riesgo nuclear, siendo los fondos propios de la entidad el amortiguador final en caso de que las pérdidas sean más altas de las previstas en un primer análisis.

Pese a ello, los ingresos de cada ramo obtenidos mediante las primas deben ser superiores a las pérdidas de los siniestros de esa misma rama, bajo condiciones normales. Esto plantea un problema serio cuando se contrasta con las necesidades teóricas de un seguro industrial nuclear, puesto que los costes ante un accidente nuclear ascienden a miles de millones de euros y, por tanto, la prima a cobrar a las instalaciones nucleares sería también millonaria, siendo esta suma demasiado alta; los dueños de las centrales nucleares no podrían hacer frente a este gasto. Por esta razón, las entidades aseguradoras se muestran reacias a asumir responsabilidades relacionadas con accidentes que pueden llegar a alcanzar cantidades desorbitadas (Radetzki et al., 2000).

2.5.2 CONSORCIOS (POOLS)

Queda claro con todo esto, que las aseguradoras, de forma individual, no pueden cubrir los riesgos nucleares sin ayuda, así comienzan a surgir alternativas para cubrir este tipo de riesgos, siendo la más destacada los *pools*, o **consorcios** en español. Las entidades aseguradoras se empezaron a asociar para poder obtener una mayor capacidad financiera.

Los *pools* nacen bajo la idea de crear una relación bilateral entre el sector nuclear, los gobiernos y el mercado de seguros. Así, las entidades de seguros se unen para, de forma conjunta, participar hasta un nivel de cuota fijado en el aseguramiento de un determinado riesgo o ramo (Reitsma, 2000; Faure et al., 2008).

Se trata de un acuerdo contractual ex ante entre las aseguradoras, y en algunos casos reaseguradoras, que se realiza cuando el número de riesgos a asegurar son reducidos y en gran parte desconocidos, lo que causa que la cobertura por métodos convencionales sea muy arriesgada. Estos acuerdos se basan en los principios fundamentales de solidaridad y mutualidad entre los miembros del *pool* (Reitsma, 2000; Faure et al., 2008).

Los explotadores de las centrales nucleares pueden contratar así los seguros de responsabilidad civil nuclear directamente al *pool*, sin necesidad de tener que contactar con todos los miembros del mismo de forma individual. Asimismo, este tipo de reaseguro entre *pools* es directo, es decir, no intervienen intermediarios y,

por consiguiente, sus costes son mínimos, consiguiendo una eficiencia de costes (Reitsma, 2000).

Otras características clave de estos *pools* son las siguientes (Florin et al., 2014; Reitsma, 2000):

- Su funcionamiento depende de la legislación del país que operan y de su establecimiento individual.
- Cada uno de los miembros del *pool* establece la cantidad máxima a proporcionar para la cobertura de seguro y, si se realizan pagos por indemnizaciones, deben contribuir según lo acordado contractualmente.
- En los contratos de las aseguradoras con los *pools* se suele incluir una cláusula de solidaridad.
- No están sujetos a la normativa de solvencia que se aplica en el mercado de seguros.
- Al organizarse el reaseguro entre grupos se garantiza que es transparente y que está protegido en contra de la acumulación de riesgos desconocidos.

Los primeros *pools* aparecieron a mediados de la década de 1950 en Estados Unidos, aunque se crearon de forma separada, unos para cubrir la responsabilidad civil y otros los daños propios, entre otros. También las mutuas empezaron a crear sus *pools* poco después. En Europa, los primeros aparecieron en Reino Unido y en Suecia, que abrieron el camino a los demás países europeos (Gómez del Campo, s.f.).

Hoy en día hay 31 *pools* que operan en más de 300 países, que se reúnen a nivel mundial en las **Conferencias de Presidentes de Pools**, donde tratan los problemas técnicos del seguro. Además, a nivel europeo, se reúnen anualmente en la **Comisión General del Riesgo Atómico (CGRA)** del **Comité Europeo de Seguros (CEA)**, los cuales colaboran de forma activa con la **Agencia para la Energía Nuclear (AEN)** y la **Agencia Internacional para la Energía Atómica (AIEA)**, que son expertos gubernamentales en la materia de responsabilidad civil nuclear (Gómez del Campo, s.f.). Cabe remarcar que los consorcios se crean a nivel nacional y no compiten entre sí (Faure et al., 2008).

Desde el comienzo de estos *pools* se consideró que estos eran claves para los seguros atómicos y se deben organizar de esta manera en todos los mercados, ya que aseguran y reaseguran las instalaciones nucleares de todo el mundo. Surgen así organismos que dictan una serie de normas que todos los *pools* deben seguir, para asegurar que hay una estructura básica común a todos, consiguiendo así que a nivel mundial todos los mercados presenten un alto nivel de homogeneidad y uniformidad (Gómez del Campo, s.f.). A continuación, se observan una serie de conceptos claves que son importantes para poder comprender el funcionamiento de los *pools*.

Base Neta

El **negocio cedido** en reaseguro se calcula como la diferencia entre el **negocio bruto** (negocio suscrito) y el **negocio neto** (negocio retenido). Este principio es denominado **base neta**, que es la cantidad máxima que los aseguradores están dispuestos a arriesgar en una instalación nuclear, sin recurrir al reaseguro. Este principio es el que siguen también los *pools* cuando actúan como reaseguradores para riesgos en el extranjero, pues la cobertura que ofrecen debe de ser exclusivamente determinada en base a la capacidad de retención que tienen por cuenta propia los miembros del *pool*. Además, en ningún caso se puede retroceder o ceder otra vez los riesgos asumidos mediante el reaseguro con otros *pools*. El objetivo de este principio de base neta es delimitar el riesgo, de esta manera, en caso de accidente nuclear, solo se verán afectadas las cesiones de reaseguro para este tipo de riesgos.

Coaseguro

Los riesgos nucleares deben intentar coasegurarse dentro de la medida de lo posible. Se intenta que las relaciones entre los *pools* sean de coaseguro. Sin embargo, esta idea presenta muchas trabas debido a las disposiciones legales.

*Cooperación entre pools***

Hay una estrecha colaboración entre los *pools*, se informan entre ellos sobre los datos técnicos de los riesgos que cubren. También la tarificación se hará de común acuerdo, donde los diferentes *pools* ponen en común su experiencia individual. A su vez, cuando ocurre un siniestro todos los *pools* son informados. Debido a esta interdependencia se reparten también los riesgos, cediéndose riesgos entre ellos. Así, los *pools* organizan sus operaciones por grupos dependiendo de la procedencia del mismo. De esta forma, en el negocio doméstico pueden participar todas las entidades aseguradoras interesadas que operan en dicho país, pero en el negocio procedente de otros países solo pueden participar las aseguradoras que son nacionales, pues así las aseguradoras extranjeras pueden reservar toda su capacidad para usarla donde más eficaz sea (Gómez del Campo, s.f.).

Es decir, una aseguradora alemana con delegación en España puede participar como coaseguradora en los riesgos que ocurran en este país, pero no podrá participar en los riesgos que el *pool* español acepte al *pool* italiano. Para participar en ellos tendría que hacerlo mediante su delegación en Italia, si la tuviese, o a través de su casa matriz en Alemania, a través del Reaseguro aceptado por el *pool* alemán al *pool* italiano.

Control del reaseguro

Cabe destacar también que solo los propios *pools* pueden reasegurarse entre ellos, quedando prohibido el reaseguro entre entidades aseguradoras, aunque en ciertas ocasiones se permite que grandes entidades reaseguradoras a nivel mundial puedan participar en el reaseguro de riesgos que estén situados en países diferentes a los suyos, o bien a través de la sección de riesgos localizados en el extranjero del *pool* de su país, o bien como reaseguradores en el *pool* del país donde están localizados esos riesgos.

Reciprocidad

Las aseguradoras que conforman los *pools* siguen unos principios de reciprocidad, por lo que cuando un *pool* usa una cobertura que ofrece otro *pool*, el primero pone a disposición del segundo su capacidad. Pongamos así por ejemplo un *pool* que se encuentra en un país A, asegura un riesgo nuclear civil en el país A, y mediante acciones de reciprocidad suscribe riesgos con otros *pools* que se encuentran en otros países, B, C, etc., así se diversifica el potencial riesgo catastrófico.

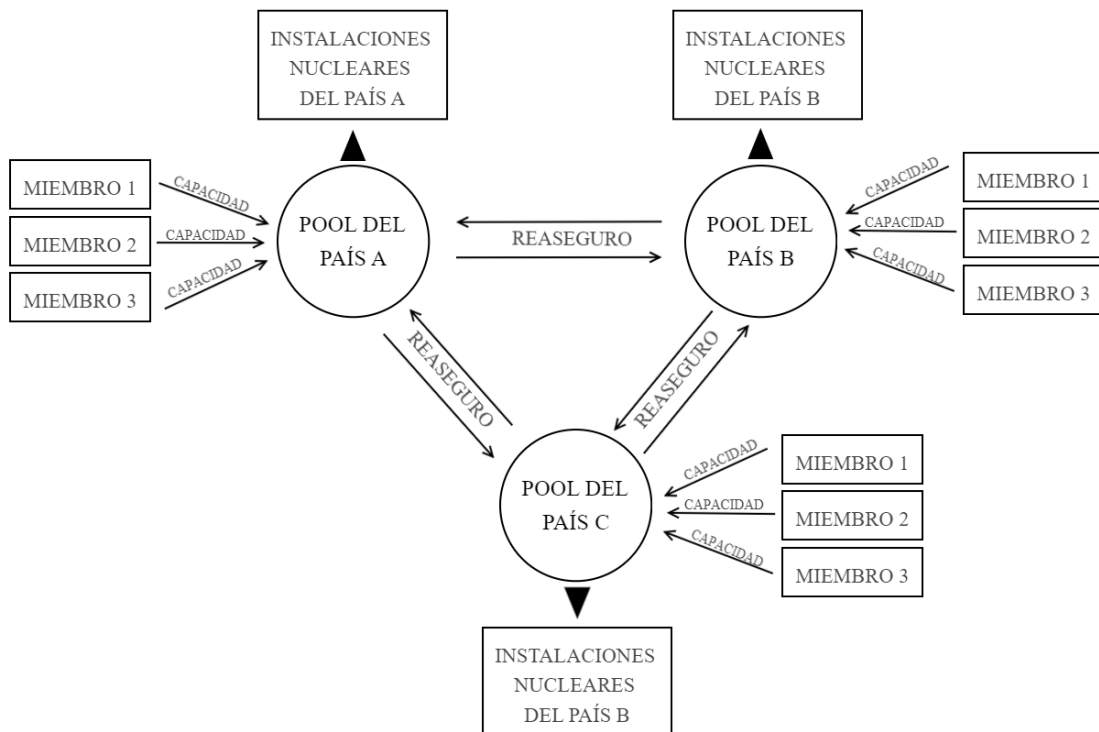


Figure 17: Flujo de negocio de los seguros nucleares. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Nuclear Risk Insurers)

POOL ATÓMICO ESPAÑOL

Fue en 1957 cuando apareció en España el **Pool Atómico Español**, un año antes de que abriera la primera central nuclear en el territorio (Gómez del Campo, s.f.). Tan solo un año después se firmó la primera cobertura internacional de Responsabilidad Civil y Daños Materiales con la Central Nuclear suiza de Beznau-1, desde 1968 hasta 1969.

Cabe destacar que, en 1992, este *pool* se dividió en dos figuras independientes. Por un lado se creó el **Convenio Español de Suscripción de Riesgos Nucleares**, denominado **Espanuclear**, conformada por las entidades de seguros y reaseguros que suscriben en común los riesgos nucleares, en régimen de coaseguro y reaseguro, ofreciendo así una mayor capacidad de cobertura del Seguro Español en los diferentes mercados nacionales e internacionales. Por otro lado, se creó **Aseguradores de Riesgos Nucleares (ARN)**, una Agrupación de Interés Económico que se encarga de la administración de Espanuclear (Rincón J., 2017 y INESE, 2017).

La Aseguradora de Riesgos Nucleares cuenta con los siguientes órganos de Gobierno: Asamblea de Socios, Consejo de Administradores, Comité Financiero y Comité Administrativo. El Consejo de Administradores y el Comité Técnico se reúnen de forma trimestral, mientras que la Asamblea de Socios se reúne de forma anual (INESE, 2017).

Actualmente, el *Pool* Nuclear Español dispone de una capacidad de aseguramiento para riesgos superiores a los 100 millones de euros, tanto para riesgos nacionales como extranjeros. A nivel internacional este *pool* español se encuentra en el puesto noveno como uno de los *pools* con mayor capacidad aseguradora nuclear (INESE, 2017).

Las tres líneas de negocio con las que trabaja Espanuclear son:

1. Instalaciones radiactivas: dan cobertura a la Responsabilidad Civil de las mismas y de la derivada del transporte del material radiactivo.
2. Instalaciones nucleares nacionales: proporcionan cobertura de Responsabilidad Civil y de Daños Materiales en las instalaciones nucleares, y en el caso de transporte de sustancias nucleares solo cubren la Responsabilidad Civil.
3. Instalaciones nucleares internacionales: proporcionan cobertura de Responsabilidad Civil y Daños Materiales en las instalaciones nucleares, incluyendo la Responsabilidad Civil con terrorismo y con coberturas para la avería de la maquinaria y pérdida de beneficios.

Por otro lado, la Aseguradora de Riesgos Nucleares, realiza un análisis detallado sobre cada uno de estos riesgos, teniendo en cuenta distintos factores como el control de cúmulos, las condiciones de renovación o el riesgo tecnológico. También realizan análisis de riesgo por países donde estudian los riesgos políticos y del terrorismo, además de la exposición al tipo de cambio. Todo esto tiene como objetivo limitar la exposición que tienen Espanuclear en cada uno de los países en los que opera.

En la *Figura 18* podemos ver las entidades aseguradoras y reaseguradoras que son miembros de Espanuclear.

AMA	HELVETIA	MUTUA TNERFEÑA
ALLIANZ	LAGUN ARO	OCASO
ALMUDENA	MAPFRE ESPAÑA	PATRIA HISPANA
AXA	MAPFRE GLOBAL RISKS	PLUS ULTRA SEGUROS
CASER	MAPFRE RE	REALE
CATALANA OCCIDENTE	METRÓPOLIS	SEGURCAIXA
FIATC	MGS	SEGUROS GENERALES RURAL
GENERALI SEGUROS	MUSAP	SANTALUCÍA
GES SEGUROS	MUTUA VENIR	UNIÓN ALCOYANA
HDI GLOBAL SE	MUTA DE PROPIETARIOS	ZURICH

Figure 18: Miembros del Pool Atómico Español. (Fuente: elaboración propia a partir de los datos de INESE)

INCONVENIENTES DE LOS *POOLS*

La creación de los *pools* nacionales y el establecimiento de la limitación de la responsabilidad en la industria nuclear fue la solución que tanto el mercado como los gobiernos encontraron para poder cubrir los riesgos nucleares y hacerlos asegurables. Sin embargo, los *pools* presentan una serie de limitaciones de peso (Faure et al, 2008):

- No son competitivos, los *pools* se benefician de una exención del derecho europeo de la competencia previsto en el artículo 81 del Tratado de Roma. Se considera que los acuerdos entre las empresas son más deseables que la competencia entre ellas. No obstante, esto puede crear una cartelización de la información y crear una barrera de entrada al mercado.
- Se organizan a nivel nacional, lo cual conlleva una serie de problemas. Entre ellos, en el caso de ocurrir un accidente nuclear con consecuencias en diferentes países, habría que determinar qué *pools* y en qué medida tendrían que hacerse responsables de los costes. Asimismo, el hecho de estar organizados a nivel nacional hace que la capacidad financiera disponible sea menor.
- Cobran unas primas demasiado altas a la industria nuclear, ya que, a la prima pura, que representa el valor objetivo del riesgo, se le tiene que sumar: los costes que tienen el consorcio, más un recargo por aversión al riesgo, más los beneficios que se llevan las aseguradoras del *pool* y, por último, los

impuestos. Así, la prima total que pagan las industrias nucleares llega a ser incluso 335 veces superior a la prima pura.

- Los accidentes nucleares pueden llegar a causar pérdidas por cuantías mucho más altas que las que los propietarios de las centrales nucleares tienen responsabilidad de pagar según los Convenios. Por consiguiente, son los gobiernos los encargados de hacer frente al resto de las pérdidas, aunque estos no tienen los suficientes medios para pagar accidentes nucleares de grandes magnitudes, lo que conlleva a que las víctimas reciban indemnizaciones por cuantías menores.

En 1995, Faure y Van den Bergh demostraron que los seguros nucleares en Bélgica estaban sometidos a la actividad de lobby. Por un lado, los *pools* se benefician de su posición dominante, restringiendo la entrada de nuevas aseguradoras y cobrando primas exageradamente altas. Por otro lado, la propia industria nuclear se beneficia del límite de responsabilidad financiera en caso de que ocurra un accidente.

Por todas estas razones, se empiezan a buscar otras posibles alternativas que tengan una capacidad financiera suficiente como para hacer frente a todos los costes de un accidente nuclear, y que a su vez tenga una mejor internalización del riesgo nuclear. Además, son muchos los economistas que defienden que la responsabilidad de los operadores de las centrales nucleares sea ilimitada, pues solo de esta manera se puede internalizar el riesgo nuclear, es decir, poder conseguir compensaciones superiores para las víctimas a un coste menor (Faure, et al, 2008). De esta forma, aunque en las revisiones del Convenio de París y de Bruselas se han aumentado los límites de responsabilidad, estas cantidades aún están lejos de ser suficientes.

2.5.3 BONOS N-CAT

A las alternativas para la transferencia de riesgos se las conocen como **ART** por las siglas en inglés de “**alternativas de transferencia de riesgo**”. Economistas como Tyran y Zweifel (1993) defienden que la transferencia de riesgo a los mercados de capital es una de las mejores soluciones, siendo este el único mercado lo suficientemente grande como para hacer frente a las grandes consecuencias que puede ocasionar un accidente nuclear. De este modo, los operadores de las centrales nucleares adquieren participaciones de riesgo en los mercados de capital en vez de recurrir a los *pools*.

La utilización de los instrumentos ILS, como son los bonos catastróficos, son claves para la cobertura de los daños por accidentes nucleares e industriales. Cabe destacar que, a menudo a los bonos catastróficos para accidentes nucleares se les denomina bonos N-CAT (“*nuclear cat bonds*”). Estos instrumentos financieros pueden cubrir graves accidentes nucleares y que el sistema tradicional de seguro no puede cubrir.

En 2000, Radetzki et al., analizaron y explicaron cómo los bonos CAT pueden usarse para las responsabilidades por accidentes nucleares; el funcionamiento de los mismos sería igual que el descrito para los bonos catastróficos que cubren otro tipo de riesgos, donde el valor del bono se usará para cubrir los costes de un accidente nuclear en caso de que este ocurra. De esta manera, el riesgo de estos siniestros se transfiere al mercado, el cual puede aportar grandes sumas de capital para poder hacer frente a los siniestros más graves. De esta manera, ya no sería necesaria la intervención del Estado para hacerse cargo de los altos costes de estos siniestros.

Asimismo, el mercado de bonos catastróficos se trata de un mercado competitivo, y no un cártel, como es el mercado de los *pools* (Radetzki et al., 2000).

El tipo de interés de los bonos catastróficos nucleares es superior a mayor probabilidad de que ocurra el riesgo a cubrir. En este sentido, los bonos catastróficos funcionan de manera similar a los bonos basura, los cuales ofrecen tipos de interés más altos debido a que las empresas que los emiten tienen poca solvencia, por lo que tienen que compensar este riesgo de crédito con intereses más altos (Radetzki et al., 2000).

Sin embargo, los riesgos catastróficos nucleares tienen probabilidades ínfimas de acaecer, por lo tanto, siguiendo esta regla, los beneficios obtenidos por los inversores también serían muy bajos. Es por esta razón que el mercado es el que fija el diferencial de crédito, que se basa en el riesgo subyacente (Radetzki et al., 2000).

En el caso de este tipo de bonos, como se explicó en el apartado “1.2 Funcionamiento”, no tiene riesgo de contrapartida gracias a la intervención de los SPV, por lo que el único riesgo es que las reclamaciones por daños tras una catástrofe nuclear sean de gran gravedad.

También se tienen que especificar detalladamente qué tipo de daños cubren estos bonos. Por lo general, estos suelen ser los costes por daños en las infraestructuras y por los costes incurridos por las evacuaciones pertinentes; aunque también se suelen incluir los costes sanitarios, debido a que uno de los efectos más graves que causan los accidentes nucleares son los problemas de salud debido a la radiación (Radetzki et al., 2000).

Los emisores de estos bonos N-CAT pueden ser un grupo de aseguradores de operaciones nucleares que buscan una manera de asegurar el riesgo que están cubriendo, aunque estos bonos podrían también ser emitidos directamente por los operadores de las instalaciones nucleares o incluso por una institución gubernamental cuyo objetivo sea cubrir este tipo de riesgos (Radetzki et al., 2000). Así las aseguradoras podrían reasegurar el riesgo nuclear, y los operadores no tendrían que pagar primas tan altas.

A pesar de las numerosas ventajas que presentan los bonos N-CAT, hasta la fecha no se ha llegado a emitir aún ningún bono para los riesgos nucleares.

Esto se debe a que aún hay varios problemas que impiden que los bonos N-CAT sustituyan de forma completa al papel que tienen los *pools* y los gobiernos en cuanto a los riesgos nucleares, pues aún es necesaria la creación de una legislación que regule detalladamente este tipo de mercado, donde haya unas normas claras que determinen el alcance de la responsabilidad de la industria nuclear y la de los titulares de los bonos catastróficos (Radetzki et al., 2000).

Otra de las razones por las que este sistema aún no se ha llegado a implementar es debido a que, muy probablemente, los operadores de las instalaciones nucleares pasarían a tener responsabilidad ilimitada, por ende, la industria nuclear tiene pocos incentivos para querer usar estos bonos catastróficos en vez del sistema actual (Radetzki et al., 2000).

Esto se debe a que, la responsabilidad limitada establecida por los Convenios de París y de Viena, debido principalmente al problema de que ni las entidades aseguradoras ni gubernamentales pueden hacer frente a los altos costes de un accidente nuclear grave, crea un riesgo moral ("*moral hazard*"). Ya que, a menudo, las empresas se centran en minimizar los costes para maximizar los beneficios, esto puede causar fallos de seguridad causando accidentes; al tener los operadores unas responsabilidades limitadas tienen menos incentivos para hacer las cosas bien (Radetzki et al., 2000). Por lo tanto, de eliminar esta limitación de la responsabilidad, los operadores de las centrales nucleares se verían incentivados para reforzar la seguridad de las instalaciones y reducir así la probabilidad de que ocurran accidentes.

En conclusión, los bonos N-CAT son una buena alternativa de transferencia de riesgos, que solventan muchos de los problemas que los actuales *pools* presentan. Es importante recordar que los primeros *pools* aparecieron en la década de 1950 para dar solución a la incapacidad financiera de las aseguradoras a cubrir los riesgos nucleares, sin embargo, desde entonces el mercado financiero ha evolucionado enormemente, creando nuevos instrumentos financieros, como son los bonos catastróficos, que suponen un importante avance en el sector asegurador.

INDIA Y LOS BONOS N-CAT

El Gobierno de India lleva considerando desde 2015 la posibilidad de crear una estructura que combine los bonos catastróficos con una garantía soberana para asegurar a proveedores extranjeros sobre la seguridad de las leyes de responsabilidad nuclear del país. Esta solución se plantea debido a que la reaseguradora nacional GIC (General Insurance Company) tiene una capacidad financiera demasiado limitada. Se descartó la idea de pedir ayuda a reaseguradoras extranjeras o a crear un fondo común de riesgos nucleares, pues la capacidad financiera seguía siendo demasiado insuficiente (The Economic Times, 2015).

Así, los bonos catastróficos son la única solución que han encontrado para poder obtener el capital suficiente, y con las garantías soberanas se consigue infundir la confianza necesaria para atraer a proveedores extranjeros al mercado nuclear indio. De esta manera, los proveedores extranjeros pueden acceder al mercado de energía nuclear civil sabiendo que hay un sistema seguro que garantiza la responsabilidad frente a los accidentes que puedan ocurrir en las centrales nucleares (The Economic Times, 2015).

2.5.4 OTRAS ALTERNATIVAS

Los bonos catastróficos presentan una buena opción para cubrir el riesgo nuclear. Sin embargo, como se comentaba anteriormente, aunque estos bonos se usan para otro tipo de riesgos naturales, no se ha llegado a emitir ningún bono para al riesgo nuclear. A continuación, se presentan algunas alternativas populares que sí se han llegado a implementar en Europa y Estados Unidos.

MUTUAS

Una de las alternativas más comunes y conocidas son las mutuas. Estas comienzan por primera vez en Estados Unidos, con el objetivo de complementar a los *pools*. Las dos mutuas que se crean Estados Unidos son: NEIL y ONEIL (Seguro Eléctrico Nuclear Limitado), que complementan al *pool* ANI (Aseguradoras Nucleares Americanas). Bélgica fue el primer país de Europa que siguió esta iniciativa, creando la mutua ELINI10 (Seguro Europeo de Responsabilidad Civil para la Industria Nuclear) y EMANI9 (Asociación Mutual Europea de Seguros Nucleares) (Faure, et al., 2008).

El objetivo de EMANI es indemnizar a sus asegurados contra los daños materiales y la interrupción de negocio debido a incendios, riesgos nucleares, fuerzas naturales y otros daños ocurridos en las instalaciones nucleares e inmuebles. EMANI cubre hoy en día más de 100 plantas nucleares en Bélgica, Canadá, Finlandia, República Checa, Francia, Estados Unidos y Hungría, entre otros (EMANI, 2020).

Las mutuas de seguros proporcionan una cobertura a los riesgos relacionados con la industria nuclear, pero a diferencia de los *pools*, estas se organizan a nivel internacional y se financian de las contribuciones de los afiliados. Pese a que la capacidad financiera de las mutuas es independiente a la de los *pools* nacionales, estas están vinculadas a los *pools*, obligándolas a seguir las normas y recomendaciones de los expertos de los *pools* (Faure et al., 2008).

Las principales ventajas de las mutuas son dos. Por un lado, las mutuas tienen la posibilidad de reducir las cotizaciones en el tiempo y de poder distribuir los beneficios con los afiliados. Además, las mutuas crean un foro que incentiva el intercambio de información en materia de seguros nucleares, donde ponen en común su experiencia (Faure, G.M. et al, 2008).

A pesar de que tanto los *pools* como las mutualidades permiten aumentar la capacidad financiera de la responsabilidad civil nuclear, accidentes como el de Fukushima ponen en relieve la importancia del papel de Estado, puesto que, debido a los altos costos del accidente, sumados a los costes de estabilización de emplazamientos y limpieza, las cifras son tan altas que ninguna empresa podría hacerle frente, incluso tratándose de un consorcio de aseguradoras (World Nuclear News, 2021).

RESERVAS

Los operadores de las instalaciones nucleares deben disponer de activos disponibles suficientes para que, en caso de accidente, puedan hacer uso de estas reservas para hacer frente a los costes. El problema de esto es, claramente, la dificultad de disponer tal cuantía de activos, la cual sería tan elevada que sería casi imposible de conseguir. Sin embargo, dado que muchas instalaciones nucleares son propiedad del Estado, estos pueden tener acceso a sus fondos; y las que son de propiedad privada pueden firmar acuerdos con el Estado para que este les pueda respaldar (Faure et al, 2008).

El otro gran problema de este método es que los activos de la reserva son capital inmovilizado, es decir, forman parte de los fondos de capital de los operadores y no generan ningún tipo de beneficio. Debido a estas desventajas, pocas son las centrales nucleares usan este método, una de ellas es la operadora francesa EDF, la cual es 80% propiedad estatal (Faure et al, 2008).

RISK-SHARING

Este método de riesgo compartido o "*risk-sharing*" consiste en agrupar a los operadores de las instalaciones nucleares, los cuales comparten el mismo riesgo, en un mismo *pool*. Se suele aplicar principalmente para cubrir riesgos inciertos de grandes magnitudes. Este concepto de compartir el riesgo ha sido estudiado por expertos como Faure y Hartlief (2003) y Pelzer (2007).

En Europa, aunque el riesgo compartido aún no ha llegado a ser aplicado para los riesgos nucleares, sí existen acuerdos entre los operadores de otro tipo de industrias, los cuales buscan cubrir los riesgos medioambientales y tecnológicos, entre otros. No obstante, en Estados Unidos sí que se ha llegado a poner en práctica acuerdos similares para cubrir los riesgos nucleares.

Estados Unidos se rige por la Ley Price-Anderson, donde la responsabilidad civil de los operadores está dividida en dos niveles de riesgo. Por un lado, la responsabilidad de los operadores, que en 2005 se modificó a 300 millones de dólares americanos. Al igual que ocurre en Europa con los Convenios de Bruselas y de París, esta responsabilidad civil debe de estar cubierta obligatoriamente. El segundo nivel de riesgo en Europa lo cubre el Estado, sin embargo, en Estados Unidos existen estos acuerdos de riesgo compartido, donde los operadores de las instalaciones nucleares pagan una prima retroactiva por cada reactor, para cubrirse en caso de que los costes del accidente superen la cuantía del primer nivel de riesgo. Estas primas se calculan prorratea, y se basan en un reparto solidario y mutuo entre los operadores nucleares (Faure et al, 2008).

Todos los operadores ofrecen una garantía de pago cada año a la NRC (Comisión Reguladora Nuclear), el cual se encarga de asegurar que esta promesa sea válida. Esta Comisión se encarga de regular las centrales nucleares con fines comerciales y otros usos nucleares como la medicina. Además, realiza concesiones de licencias, ampliación de la normativa e inspecciones (Faure et al., 2008).

Una de las principales ventajas de este método es que los operadores no tienen que depender del Estado o de los seguros para que se hagan cargo de los costes. Otra ventaja es que, a diferencia de los seguros, no es necesario tener información precisa sobre las probabilidades y los costes que tienen los riesgos a cubrir para calcular las contribuciones, lo cual puede suponer un reto cuando se trata de riesgos poco comunes, como es el nuclear. Aunque sí que es necesario diferenciar qué riesgos genera cada miembro del *pool*, para saber qué riesgo es generado por cada miembro. Para ello, se pueden diferenciar las operadoras en base a las diferencias en las normas de seguridad, el tamaño de las instalaciones o en las diferentes tecnologías que usan (Michel-Kerjan et al., 2006; Faure et al., 2008).

Otra de las ventajas del riesgo compartido es la diferencia en los costes. Mientras que los seguros suelen conllevar el pago de una prima anual, la cual no puede recuperar el operador, aunque ningún accidente tenga lugar, tratándose así de un coste hundido o "*sunk cost*". No obstante, para el caso de los riesgos compartidos, la contribución que realizan anualmente los miembros se puede recuperar en caso de que cesen su actividad, y por tanto ya no suponga un riesgo. Este dinero contribuido solo se pierde en caso de que se produzca un siniestro, en cuyo caso este dinero se destinará al pago de los costes. Por tanto, las contribuciones que se realizan un año se pueden trasladar como contribución al año siguiente si no ha habido ningún accidente, aunque sí que se actualizarán estos pagos en base al nivel de riesgo y otros gastos. Así pues, los operadores no sufren costes excesivos todos los años (Wu et al., 2005; Faure, et al., 2008).

CAPÍTULO III: VALORACIÓN DE LOS BONOS N-CAT

3.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA

A pesar de la gran popularidad que han ganados los bonos catastróficos en las últimas décadas, no se han realizado muchos estudios basados en la **fijación de precios** o “*pricing*” de los bonos catastróficos.

Cox y Pedersen (2000) propusieron un modelo discreto de fijación de precios sin arbitraje. En este modelo hay dos tipos de variables aleatorias, una que únicamente depende de los mercados financieros, y otra que únicamente depende de las catástrofes naturales. Además, Cox y Pedersen expusieron que el riesgo de contrapartida de los valores basados en seguro no está correlacionado con el mercado financiero. En consecuencia, los riesgos de los bonos catastróficos no se pueden cubrir mediante activos tradicionales o valores primitivos.

Debido a esto, a la hora de fijar el precio de un bono CAT se necesita tener un marco de **mercado incompleto**, esta idea ha sido corroborada por Harrison y Kreps (1979) y Vaugirard (2003). Así pues, los bonos CAT no se pueden cubrir perfectamente en un mercado incompleto, y, por tanto, los altos rendimientos recibidos pueden llegar no ser suficientes para compensar el riesgo que corren los inversores.

No existe una teoría de precios universal para el marco de mercado incompleto. Wang (2004) aplicó la transformación de Wang para abordar este carácter incompleto. Este enfoque también fue adoptado por Lin y Cox (2005) y Pelsser (2008), mientras que Froot y Posner (2000, 2002) optaron por aplicar la medida mínima de martingala y Schweizer (1995) utilizó una medida de martingala óptima de la varianza.

Varios estudios han usado procesos estocásticos, usando el supuesto de tiempo continuo, para fijar el precio de este tipo de bonos. Baryshnikov et al. (2001) presentaron un precio en ausencia de arbitraje en tiempo continuo y sin cupón cero, y Dassios y Jang (2003) incorporaron un proceso de Poisson doblemente estocástico compuesto.

Otro enfoque a la metodología de tiempo continuo se basa en modelar el activador o “*trigger*” involucrando el proceso de pérdida agregada. Vaugirard (2003) fue el primero en desarrollar este tipo de modelo. Desarrolló un enfoque de arbitraje simple para poder evaluar los valores vinculados a seguros que cubren el riesgo de catástrofe, donde los poseedores de bonos CAT tienen posiciones cortas de una opción. Usando este enfoque, Lee y Yu (2013) propusieron un método de aproximación mixta, cuyo objetivo era simplificar la distribución de la pérdida agregada y así poder encontrar soluciones numéricas de los bonos CAT con fórmulas de precios generales.

Lee y Yu (2002, 2007) también desarrollan un modelo donde los bonos CAT son emitidos por el sponsor y no por el SPV; debido a esto, en este modelo, los bonos catastróficos están sujetos al riesgo de contrapartida.

Por otro lado, Jarrow (2010) presenta una metodología diferente, pues el resto de los modelos se resuelven mediante aproximaciones numéricas. Jarrow, sin embargo, propuso un modelo que admite una solución de forma cerrada para el precio de los bonos CAT. Este modelo se basa en la analogía entre el riesgo de impago y de catástrofe para así adaptar un modelo de valoración de derivados a la valoración de los bonos catastróficos; para ello usa dos parámetros de entrada (*“inputs”*): la frecuencia y la severidad de los riesgos catastróficos. Es un modelo sencillo, pero con unas estimaciones empíricas de estos dos parámetros que pueden llegar a ser muy difíciles de obtener debido a la falta de liquidez de los bonos CAT.

El enfoque de Cox y Pedersen también fue la base de los trabajos de Zimbidis, Frangos y Pantelous (2007), los cuales fijaron los precios de los bonos CAT mediante un modelo simple de un periodo, y otro más complicado de multiperiodo. El enfoque actuarial de estos autores se distingue del resto de la literatura en que usan exclusivamente la probabilidad mundo real.

Enfocado a los bonos catastróficos para accidentes nucleares, Shao et al. (2007) modelizaron la dependencia del tiempo entre las llegadas de las reclamaciones, siguiendo las reclamaciones agregadas un proceso de semi-Markov. Autores como Jassen y Manca (2007) también han aplicado la estructura dependiente de Markov en sus trabajos, aunque fueron un año antes Ayyub et al. (2006) quienes propusieron por primera vez un modelo de fijación de precios para los bonos catastróficos para los accidentes nucleares.

En este trabajo se proponen bonos catastróficos centrados en los riesgos nucleares con un tipo de cobertura múltiple. Es por ello por lo que son los trabajos de estos últimos autores mencionados los que han sido principalmente consultados y estudiados para la realización de trabajo.

Cabe destacar que los bonos catastróficos para riesgos nucleares que se modelizan en este trabajo usan activadores por indemnización, concretamente un activador de tipo de dos coberturas, por ocurrencia y por pérdida agregada.

3.2 TEORÍA DE LA VALORACIÓN

Para determinar el precio de los bonos nucleares catastróficos se usan una serie de hipótesis que son comunes a todos los bonos catastróficos. Estas hipótesis han sido comúnmente usadas por muchos autores (Cox y Pedersen, 2000; Shao et al., 2017; Zimbidis et al., 2017), pues permiten simplificar los cálculos matemáticos sin ser demasiado restrictivas. Estas hipótesis son tres:

1. Ausencia de arbitraje, por lo que se usan las probabilidades neutrales al riesgo.
2. Las variables financieras y las catastróficas son independientes entre sí.
3. Los cambios de los tipos de interés se pueden replicar usando instrumentos financieros existentes.

La fecha de vencimiento de un bono CAT se define como $0 < T < \infty$, donde el intervalo de negociación, $[0, T]$, es continuo. La incertidumbre del mercado se define en un **espacio de probabilidad filtrado** (“**filtered probability space**”), $(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_t)_{t \in [0, T]}, \mathbb{P})$, también conocido como “*stochastic basis*”, donde \mathcal{F} , es una familia creciente de sub- σ -álgebra de $\mathcal{F} = \mathcal{F}_t^{(1)} * \mathcal{F}_t^{(2)} \subset \mathcal{F}$ para $t \in [0, T]$ (Planetmath, 2010).

Al tener un intervalo de negociación continuo es necesario imponer ciertas condiciones al espacio de probabilidad filtrado (Planetmath, 2010):

1. Tiene que ser continuo desde la derecha (“*right-continuous*”), $\mathcal{F}_t = \mathcal{F}_{t+} : \bigcup_{s>t} \mathcal{F}_s, t \geq 0$.
2. El espacio de probabilidad tiene que estar completo.
3. σ -álgebra \mathcal{F}_t contiene todos los \mathbb{P} -conjunto nulo de \mathcal{F} .

Para los bonos N-CAT, $\mathcal{F}_t^{(1)}$, representa la información financiera que hay disponible en el mercado en el momento t . Esta variable de riesgo financiero se puede modelar en un espacio de probabilidad filtrado $(\Omega^{(1)}, \mathcal{F}^{(1)}, (\mathcal{F}_t^{(1)})_{t \in [0, T]}, \mathbb{P}^{(1)})$. $\Omega^{(1)}$ es el espacio muestral, que representa todos los caminos que pueden tomar las variables financieras en el mercado durante un periodo de negociación $t \in [0, T]$. $\mathbb{P}^{(1)}$ queda definido en σ -álgebra y, $\mathcal{F}^{(1)}$, es la filtración que representa la forma en la que la información evoluciona en el mercado. Esta sigue una secuencia creciente durante el periodo de tiempo $t \in [0, T]$, pues de esta manera la información no se pierde en el tiempo,

$$\mathcal{F}^{(1)} = \left\{ \mathcal{F}_t^{(\infty)} \subseteq \mathcal{F}_1^{(1)} \subseteq \dots \subseteq \mathcal{F}_T^{(1)} \right\}. \quad (1)$$

Los eventos que ocurren en $\mathcal{F}_t^{(1)}$ conforman la información de inversión disponible en el mercado en el momento de tiempo t , normalmente sobre los precios de cotización pasados. Siguiendo la hipótesis I, se asumen que estos precios de cotización históricos son bonos libre de riesgo, simplificando de esta manera los cálculos.

Las variables de riesgo catastróficas, $\mathcal{F}_t^{(2)}$, también se modelan en un espacio de probabilidad filtrado. Donde $(\Omega^{(2)}, \mathcal{F}^{(2)}, (\mathcal{F}_t^{(2)})_{t \in [0, T]}, \mathbb{P}^{(2)})$ es la medida de probabilidad que rige la estructura de la catástrofe. $\mathbb{P}^{(2)}$, es la probabilidad de que ocurra un evento catastrófico y, $\mathcal{F}^{(2)}$, es la filtración indexada en el mismo periodo de tiempo que las variables de mercado financieras, $t \in [0, T]$.

De esta manera, el espacio muestral y la filtración para todo el modelo será respectivamente $\Omega = \Omega^{(1)} * \Omega^{(2)}$ y $\mathcal{F}_t = \mathcal{F}_t^{(1)} * \mathcal{F}_t^{(2)}$. Gracias a esta última ecuación, se verifica que $\mathcal{F}_t^{(1)}$ y $\mathcal{F}_t^{(2)}$ no cumplen la condición de independencia en \mathbb{P} . Por tanto, la hipótesis II no se cumple. Es por ello que será necesario introducir dos nuevas filtraciones al modelo: $\mathcal{A}^{(1)}$ y $\mathcal{A}^{(2)}$. Estas sí serán independientes entre sí bajo la medida de probabilidad \mathbb{P} . Esto queda demostrado por el Lemma 5.1 de Cox y Pedersen, 2000.

Lemma 5.1 (Cox y Pedersen, 2000)

Si $\alpha_1 \in \mathcal{A}_T^{(1)}$ y $\alpha_2 \in \mathcal{A}_T^{(2)}$, entonces,

$$\alpha_1 = A_1 * \Omega^{(2)} \text{ para algunos } A_1 \in \mathcal{F}_T^{(1)}, \quad (2)$$

y

$$\alpha_2 = A_2 * \Omega^{(1)} \text{ para algunos } A_2 \in \mathcal{F}_T^{(2)}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\alpha_1 \cap \alpha_2) &= \mathbb{P}(A_1 * A_2) \\ &= \mathbb{P}(A_1) * \mathbb{P}(A_2) \\ &= [\mathbb{P}_1(A_1) \cdot 1] * [1 \cdot \mathbb{P}_2(A_2)] \\ &= [\mathbb{P}_1(A_1)\mathbb{P}(\Omega^{(2)})][\mathbb{P}_1(A_2)\mathbb{P}_2(\Omega^{(1)})] \\ &= \mathbb{P}(\alpha_1)\mathbb{P}(\alpha_2). \end{aligned} \quad (4)$$

Gracias a esta condición de independencia, se podrá trabajar con variables aleatorias que solo dependan o de las variables de riesgo financiero o de las catastróficas.

$$\mathcal{A}_t^{(1)} = \mathcal{F}_t^{(1)} \{ \emptyset, \Omega_2 \} \text{ para } t \in [0, T], \quad (5)$$

$$\mathcal{A}_t^{(2)} = \mathcal{F}_t^{(2)} \{ \emptyset, \Omega_1 \} \text{ para } t \in [0, T]. \quad (6)$$

Así, una variable aleatoria X en $(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_t)_{t \in [0, T]}, \mathbb{P})$ solo será dependiente de las variables de riesgo financiero, si X se puede medir con respecto a $\mathcal{A}^{(1)}$. Esto también se cumple de forma análoga para el caso de los procesos estocásticos, pues un proceso estocástico Y evolucionará solo debido a su dependencia con las variables de riesgo financiero si Y está adaptado a $\mathcal{A}^{(1)}$.

De igual forma, una variable aleatoria X en $(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_t)_{t \in [0, T]}, \mathbb{P})$ solo será dependiente de las variables de riesgo catastróficas si X se puede medir con respecto a $\mathcal{A}^{(2)}$. Y un proceso estocástico Y evolucionará solo debido a su dependencia con las variables de riesgo catastróficas si Y está adaptado a $\mathcal{A}^{(2)}$.

Asimismo, de acuerdo con el Lemma 5.2 de Cox y Pedersen (2000), bajo un supuesto en que el consumo agregado solo depende de las variables de riesgo financiero, para cualquier variable aleatoria X , que solo dependa de las variables de riesgo catástroficas, se cumple que, $E^{\mathbb{Q}}[X] = E^{\mathbb{P}}[X]$. Ya que las Ω -álgebras $\mathcal{A}^{(1)}$ y $\mathcal{A}^{(2)}$ son independientes bajo una medida de probabilidad neutral al riesgo \mathbb{Q} . Además, en acorde con la

hipótesis II, nos encontramos ante una ausencia de arbitraje en el mercado. Por tanto, en cualquier momento de tiempo t , el precio de una reclamación contingente (“*contingent claim*”), con unos pagos $\{P(T) : T > t\}$, se puede calcular mediante el teorema fundamental de la valoración del precio de los activos de Delbaen y Schachermayer (1994),

$$V(t) = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}}(e^{\int_t^T r(s)ds} P(T) | \mathcal{F}_t). \quad (7)$$

Donde $\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}$ representa la expectativa equivalente bajo la medida de probabilidad \mathbb{Q} y $\{r(t) : t \in [0, T]\}$ es el tipo de interés spot, el cual seguirá un movimiento browniano estándar.

3.3 PROCESO DE TIPOS DE INTERÉS

3.3.1 MODELO CIR

El primer modelo de tipos de interés estocásticos fue propuesto por Merton, en 1973, al que más tarde siguieron otros modelos como el de Cox, en 1985, o Hull y White, en 1990 ². En este trabajo se analizará uno de los modelos más conocidos para modelar los movimientos de la tasa de interés, el modelo Cox-Ingersoll-Ross (CIR), fue desarrollado en 1985 por John C. Cox, Jonathan E. Ingersoll y Stephen A. Ross como una rama del modelo Vasicek Interest Rate. El modelo CIR se trata de un modelo de un solo factor (“*one-factor model*”), pues los movimientos en los tipos de interés son impulsados por una sola fuente de riesgo de mercado. Este modelo determina que la tasa de interés instantánea (“*spot interest rate*”) $r(t)$ sigue una ecuación diferencial estocástica, comunmente conocida como el proceso de CIR,

$$dr_t = k(\theta - r_t)dt + \sigma\sqrt{r_t}dW_t, \quad (8)$$

donde $W(t) : t \in [0, T]$ es un proceso de Wiener, que modela el factor de riesgo de mercado aleatorio. Este proceso de Wiener, o movimiento browniano estándar, sigue una medida neutral al riesgo \mathbb{Q} .

Los parámetros k , θ y σ son constantes positivas, donde k corresponde a la velocidad de ajuste a la media; θ es la media a largo plazo; y σ representa la volatilidad. Así, el factor $k(\theta - r_t)$ garantiza la reversión media de la tasa de interés hacia el valor a largo plazo θ (la tasa de interés, r_t , se mueve en la dirección de su media, θ , a la velocidad k). Este factor es el mismo que usa Vasicek en su modelo. Por otro lado, el factor de desviación estándar, $\sigma\sqrt{r_t}$, evita mediante la raíz cuadrada que los tipos de interés sean negativos. También se excluye el tipo de interés cero si se cumple que $2k\theta \geq \sigma^2$.

²En 2013 Nowak y Romaniuk hicieron un estudio de los diferentes precios de los bonos catastróficos cuando se usan diferentes tipos de interés spot. Entre otros compararon el modelo de Vasicek, CIR y Hull-White. Para más información sobre otros modelos de tipo de interés dinámicos consultar Bringoy y Mercurio (2007)

Así, el precio de un bono cupón cero en el momento t con un vencimiento T se puede calcular mediante las ecuaciones de Cox, Ingersoll y Ross (1985),

$$B_{CIR}(t, T) = A(t, T)e^{-B(t, T)r(t)}, \quad (9)$$

donde,

$$A(t, T) = \left(\frac{2he^{(h+k)(T-t)/2}}{2h + (h+k)(e^{h(T-t)} - 1)} \right)^{2k\theta/\sigma^2}, \quad (10)$$

$$B(t, T) = \frac{2(e^{h(T-t)} - 1)}{2h + (h+k)(e^{h(T-t)} - 1)} \quad (11)$$

y

$$h = \sqrt{k^2 + 2\sigma^2}. \quad (12)$$

3.3.2 ESTIMACIÓN DE MÁXIMA VEROSIMILITUD

Para estimar los tipos de interés del modelo CIR es necesario que los parámetros involucrados, k , θ y σ , sean calibrados con las tasas de interés del mercado. Hay varios enfoques que se pueden usar para estimar estos parámetros del modelo CIR; en este trabajo se aplicará el método de estimación de máxima verosimilitud, también conocido por sus siglas, EMV. Este modelo fue propuesto por Kladivko, en 2007, en su trabajo “Maximum Likelihood Estimation of the CoxIngersoll-Ross Process”. En este trabajo se expone que para la estimación de máxima verosimilitud del vector de parámetros $\Theta = (k, \theta, \sigma)$ se requieren las densidades de transición. Para el caso del proceso CIR esta densidad de transición tiene una expresión cerrada. Dado r_t en el tiempo t , la densidad de $r_{t+\Delta t}$ en el tiempo $t + \Delta t$ se expresa como,

$$p(r_t + \Delta t | r_t; \Theta, \Delta t) = c e^{-u-v} \left(\frac{v}{u}\right)^{\frac{q}{2}} I_q(2\sqrt{uv}), \quad (13)$$

donde,

$$\begin{aligned} c &= \frac{2k}{\sigma^2(1 - e^{-k\Delta t})}, \\ u &= c r_t e^{-k\Delta t}, \\ v &= c r_{t+\Delta t}, \\ q &= \frac{2k\theta}{\sigma^2} - 1, \end{aligned} \quad (14)$$

y I_q es la función modificada de Bessel de primer tipo de orden q , que se define como,

$$I_q(x) = \sum_{j=0}^{\infty} \left(\frac{x}{2}\right)^{2j+q} \frac{1}{k!\Gamma(j+q+1)}, \quad (15)$$

donde Γ es la función gamma.

La estimación de parámetros se lleva a cabo en series temporales de tipos de interés con N observaciones, $r_{t_i} = 1, 2, 3, \dots, N$. Se consideran observaciones igualmente espaciadas con el paso del tiempo Δt . La función de verosimilitud para series temporales de tipo de interés con N observaciones se define como,

$$L(\Theta) = \prod_{i=1}^{N-1} p(r_{t_{i+1}}|r_{t_i}; \Theta, \Delta t), \quad (16)$$

donde $p(r_{t_{i+1}}|r_{t_i}; \Theta, \Delta t)$ es la densidad condicional de $r_{t_{i+1}}$, y dado que r_{t_i} depende de θ . Desde de un punto de vista computacional es más conveniente trabajar con la función de probabilidad logarítmica,

$$\ln L(\Theta) = \prod_{i=1}^{N-1} \ln p(r_{t_{i+1}}|r_{t_i}; \Theta, \Delta t). \quad (17)$$

Con esta función derivamos fácilmente a la función logarítmica de verosimilitud para el proceso CIR,

$$\ln L(\Theta) = (N-1) \ln c + v \sum_{i=1}^{X-1} \left\{ -u_{t_i} - v_{t_{i+1}} + 1 + \frac{1}{2}q \ln \frac{v_{t_{i+1}}}{u_{t_i}} + \ln I_q(\sqrt{2u_{t_i}v_{t_{i+1}}}) \right\}, \quad (18)$$

donde,

$$\begin{aligned} u_{t_i} &= c r_{t_i} e^{-k\Delta t}, \\ v &= c r_{t_{i+1}}. \end{aligned} \quad (19)$$

De esta forma, mediante el método de máxima verosimilitud se maximiza la función logarítmica de verosimilitud con respecto al parámetro Θ ,

$$\hat{\Theta} = (\hat{k}, \hat{\theta}, \hat{\sigma}) = \arg \max_{\Theta} \ln L(\Theta). \quad (20)$$

Además, dado que esta función logarítmica es monótona creciente, maximizar la función de probabilidad logarítmica también maximiza la función de probabilidad.

3.4 PROCESO DE RECLAMACIONES AGREGADAS (CADENAS SEMI-MARKOVIANAS)

Los bonos catastróficos siguen una estructura de pagos donde los inversores reciben una serie de pagos o cupones mientras un determinado evento catastrófico desencadenante no ocurra. Se consideran que hay dos tipos de desencadenantes, por ocurrencia y por pérdida agregada. Por un lado, los desencadenantes por pérdidas agregadas se modelan mediante un proceso de distribución compuesto, que está formado por dos procesos estocásticos, la frecuencia, N_t , y la severidad, X_t , de los eventos catastróficos, donde la frecuencia indica el número de reclamaciones, mientras que la severidad indica la cuantía de los mismos. Por otro lado, para modelar los desencadenantes por ocurrencia se usa el modelo de los estados absorbentes.

En la literatura actuarial clásica, muchos autores como Bowers Jr et al. (1986), asumían que los procesos estocásticos de la frecuencia y severidad de los eventos catastróficos eran independientes entre sí. Sin embargo, esta hipótesis era demasiado restrictiva. Es por ello que para modelar las pérdidas agregadas se opta por elegir un modelo donde se añade una relación de dependencia entre la cuantía de las reclamaciones y los tiempos de llegada de las reclamaciones, considerando que el tiempo de espera entre un siniestro y otro depende parcialmente de la severidad del anterior evento catastrófico acaecido.

Para ello, se usa el **proceso estocástico semi-Markoviano**, en vez del proceso de Markov. Puesto que las cadenas de Markov tienen la propiedad de falta de memoria, por lo que la probabilidad de que la cadena se sitúe en un estado en concreto solo depende del estado anterior; además, el tiempo en que el proceso ha estado en cada estado también es irrelevante. Para cumplir esta condición de falta memoria, los tiempos de espera siguen una distribución exponencial.

Sin embargo, con el proceso de semi-Markov, se permite que el proceso “recuerde” los estados anteriores y también cuanto tiempo ha estado en el estado actual. Cabe destacar que, aunque recuerda cuanto tiempo ha estado en el estado actual, esta información no debe afectar a la decisión sobre a qué estado debe pasar a continuación (Encyclopedia of Mathematics, 2020).

Así, los procesos de semi-Markov ayudan a comprender mejor los saltos que se producen de un estado a otro y a cuantificarlos con mayor precisión que otro tipo de productos estocásticos. Este modelo fue introducido por primera vez por Miller en 1962, y posteriormente desarrollado por Janssen en 1969 (Janseen y Limios, 1999; Janssen y Manca en 2007) y Shao et al. en 2015.

Por todo ello en este trabajo se considera una estructura de dependencia semi-Markoviana en tiempo continuo, donde el proceso $\{J_n : n \geq 0\}$ representa los sucesivos tipos de siniestros o estados del entorno, que toman valores en $J = \{1, \dots, w, w + 1, \dots, w + r\}$. Esta es una extensión presentada por Ayyub et al. en 2016, donde propone un caso más general de $(w + r)$ estados. Para simplificar la notación se determina que $W = \{1, 2, 3, \dots, w\}$ y $O = \{w + 1, w + 2, w + 3, \dots, w + r\}$, obteniendo así que,

$$J = W + O. \tag{21}$$

De esta manera se pueden diferenciar dos tipos de estados. Los estados de tránsito $W = \{1, 2, 3, \dots, w\}$, que se denominan como el trabajo del sistema, ya que son incidentes y accidentes no graves. Y los estados absorbentes $O = \{w + 1, w + 2, w + 3, \dots, w + r\}$, que representan los accidentes más graves. Cuando se produce un accidente nuclear grave, los bonos N-CAT vencen inmediatamente, pues se ha producido el evento desencadenante. Una vez que el sistema alcanza este estado no se puede salir de él. De esta manera, los emisores de los bonos catastróficos pueden determinar cuáles serán los estados absorbentes que harán que los bonos CAT se ejerzan inmediatamente en diferentes situaciones predeterminadas. A continuación,

se muestra la matriz de transición de los bonos N-CAT, $\mathbf{P} = (p_{ij}, i, j \in J)$, para un caso genérico,

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{R} \\ \mathbf{O} & \mathbf{I}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1w} & p_{1(w+1)} & \cdots & \cdots & p_{1(w+r)} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \ddots \\ p_{w1} & \cdots & p_{ww} & p_{w(w+1)} & \cdots & \cdots & p_{w(w+r)} \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & \vdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Para el ejemplo numérico que se realizará en este trabajo, se considera que hay un estado absorbente $O = 0$, y cuatro estados en el periodo de tránsito para indicar el trabajo del sistema $W = 1, 2, 3, 4$, por lo que $J = 0, 1, 2, 3, 4$, quedando la matriz de transición de la siguiente manera,

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_1 & p_0 & p_0 & p_0 & p_0 \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{30} & p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{40} & p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{pmatrix}, \quad (23)$$

donde $\sum_{j=0}^4 p_{ij} = 1, i \in J$ y \mathbf{I}_r es la matriz de identidad r por r . De esta manera, se interpreta que los bonos catastróficos nucleares tienen la misma estructura que un bono normal, pero que se ejerce antes de vencimiento cuando se cumplen dos condiciones. La primera condición es que los eventos que ocurren permanecen en su respectivo nivel de incidente o accidente, es decir, los eventos en el estado i se mantienen en el periodo de trabajo del sistema, W . La segunda condición es que la probabilidad de que ocurra el siguiente evento en el estado $j (j \in J)$ sea p_{ij} , puesto que en el caso de que ocurra un accidente grave, es decir, un evento del estado absorbente, O , el contrato del bono N-CAT se dará por terminado; el sistema no saldrá de este estado. Además, el estado $J_{N(T)}$ es donde permanece el último siniestro en la fecha del ejercicio.

También se observa que $\{T_n, n \in \mathbb{N}^+\}$ representa el instante de tiempo donde se produce el n -ésimo siniestro. Asumiendo que $0 < T_1 < \dots < T_n < T_{n+1}, \dots, T_0 = U_0 = 0$ y que $U_n = T_n - T_{n-1} (n \in \mathbb{N}^+)$ denota el tiempo de permanencia en el estado J_{n-1} . Se verifica que el proceso trivariante constituido por $\{(J_n, U_n, X_n); n \geq 0\}$ es un proceso de dependencia semi-Markoviano definido por la matriz $\mathbf{Q} = (Q_{ij}, i, j \in J)$, denominada "kernel".

$$Q_{ij}(t, x) = \mathbb{P}(J_n = j, U_n \leq t, X_n \leq x | (J_k, U_k, X_k), k = 1, 2, \dots, n-1, J_{n-1} = i), \quad (24)$$

donde J_n representa el proceso de los sucesivos siniestros, que es una cadena de Markov en tiempo continuo homogéneo irreducible en un estado J .

Este proceso cambiará su estado con cada nuevo siniestro basándose en esta matriz de transición $\mathbf{P} = (p_{ij}, i, j \in J)$. Aplicado a los bonos catastróficos, esto se traduce en que el tiempo de llegada antes del próximo evento catastrófico, U_{k+1} , depende parcialmente en la severidad del anterior evento catastrófico acaecido, X_k . Es importante resaltar que la variable aleatoria $J_n, n \geq 0$ y la variable aleatoria bidimensional $(U_n, X_n), \geq 1$, son condicionalmente independientes entre sí.

$$\begin{aligned} G_{ij}(t, x) &= \mathbb{P}(U_n \leq t, X_n \leq x | J_0, \dots, J_{n-1} = i, J_n = j) \\ &= \begin{cases} Q_{ij}(t, x)/p_{ij}, & \text{para } p_{ij} > 0, \\ \mathbb{I}\{t \geq 0\} \mathbb{I}\{x \geq 0\}, & \text{para } p_{ij} = 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

donde \mathbb{I} es un indicador de la función, y la variable aleatoria $\{J_n, n \geq 0\}$ es condicionalmente dependiente de las variables aleatorias $\{U_n, \geq 1\}$ y $\{X_n, \geq 1\}$, pues se cumple que,

$$G_{ij}(t, \infty) = \mathbb{P}(U_n \leq t | J_0, \dots, J_{n-1} = i, J_n = j), \quad (26)$$

$$G_{ij}(\infty, x) = \mathbb{P}(X_n \leq x | J_0, \dots, J_{n-1} = i, J_n = j), \quad (27)$$

y suprimiendo la condición J_n se obtiene que,

$$H_i(t, x) = \mathbb{P}(U_n \leq t, X_n \leq x | J_0, \dots, J_{n-1} = i) = \sum_{j=1}^m p_{ij} G_{ij}(t, x) \quad (28)$$

$$H_i(t, \infty) = \mathbb{P}(U_n \leq t | J_0, \dots, J_{n-1} = i), \quad (29)$$

$$H_i(\infty, x) = \mathbb{P}(X_n \leq x | J_0, \dots, J_{n-1} = i), \quad (30)$$

y asumiendo que $\{U_n, n \geq 1\}$ y $\{X_n, n \geq 1\}$ son condicionalmente independientes y dado que $\{J_n, n \geq 0\}$, entonces,

$$G_{ij}(t, x) = G_{ij}(t, \infty) G_{ij}(\infty, x), \quad \forall t, x \in \mathbb{R}, \forall i, j \in J. \quad (31)$$

Así se demuestra que el kernel de semi-Markov se puede expresar como,

$$Q_{ij}(t, x) = p_{ij} G_{ij}(t, \infty) G_{ij}(\infty, x), \quad \forall t, x \in \mathbb{R}, \forall i, j \in J. \quad (32)$$

Recordemos que $\{N(t) : t \in [0, T]\}$ representa el número de siniestros que se producen en una central nuclear, es decir, la frecuencia. Y $\{X_k : k \in \mathbb{N}^+\}$ representa la severidad. De esta manera, el proceso agregado de pérdidas, $\{L(t) : t \in [0, T]\}$, se modela mediante un proceso de Poisson compuesto,

$$L(t) = \sum_{N(t)}^{k=1} X_k, \quad (33)$$

donde $L(t) = 0$ y $N(t) = 0$. El valor del total del proceso de pérdida agregada $L(t)$, se suele calcular por el emisor del bono, para así determinar si se cumple el nivel predeterminado del evento catastrófico desencadenante, el cual ha de ser especificado en el contrato del bono.

La probabilidad conjunta de proceso trivariante constituido por $\{(J_n, T_n, L_n); n \geq 0\}$ se expresa como,

$$\mathbb{P}[J_n = j, T_n \leq t, L_n \leq x | J_0 = i] = Q_{ij}^{*n}(t, x), \quad (34)$$

$$\mathbb{P}[J_n = 0, T_n \leq t, L_{n-1} \leq x | J_0 = i] = Q_{i0}^{*n}(t, x), \quad (35)$$

donde L_n representa el importe total de los siniestros sucesivos tras la llegada del n -ésimo siniestro. Es clave el proceso Q_{i0}^{*n} , pues cuando ocurre un accidente grave, es decir, un evento del estado O , el bono catastrófico nuclear se ejecutará automáticamente. \mathbf{Q}^{*n} es una matriz de convolución por pliegues, que se puede calcular de forma recursiva en dos partes,

$$Q_{ij}^{*n}(t, x) = \sum_{k=1}^w \int_0^t \int_0^x Q_{kj}^{*(n-1)}(t-t', x-x') dQ_{ik}(t', x'), \quad (36)$$

$$Q_{i0}^{*n}(t, x) = \sum_{k=1}^w \int_0^t Q_{ik}^{*(n-1)}(t-t', x) d(Q_{kj}(t', \infty)). \quad (37)$$

Por último, recordemos que la distribución de probabilidad estacionaria viene dada por $(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_M)$, donde se cumple que $\Pi_1 + \Pi_2 + \dots + \Pi_M = 1$ y $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_M \in [0, 1]$.

Con todas estas variables claves definidas, se puede determinar el umbral, D , de un bono N-CAT para el momento de tiempo t ,

$$F_1(t, D) = \mathbb{P}(L(t) \leq D, J_N(t) = W) = \sum_{i=1}^w \sum_{i=j}^w \Pi_i \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^t (1 - H_j(t-t', \infty)) dQ_{ij}^{*n}(t', D), \quad (38)$$

$$F_2(t, D) = \mathbb{P}(L(t) \leq D, J_N(t) = O) = \sum_{i=w+1}^{w+r} \sum_{i=1}^w \Pi_i \sum_{n=1}^{\infty} Q_{ij}^{*n}(t, D), \quad (39)$$

$$F_3(t, D) = \mathbb{P}(J_N(t) = O) = \sum_{i=w+1}^{w+r} \sum_{i=1}^w \Pi_i \sum_{n=0}^{\infty} Q_{i0}^{*n}(t, D), \quad (40)$$

$$F_4(t, D) = \mathbb{P}(L(t) > D, J_N(t) = W) = 1 - F_1(t, D) - F_3(t, D). \quad (41)$$

Donde F_1 representa la probabilidad de que las pérdidas totales sean inferiores al nivel dado por el umbral, y que el último evento que acaezca no sea un accidente grave. F_2 representa la probabilidad de que las pérdidas totales sean inferiores al nivel dado por el umbral, pero que el último evento que acaezca sea un accidente grave. F_3 es la probabilidad de que ocurra un accidente grave. Y por último, F_4 , que es la probabilidad de que haya una pérdida mayor que el nivel de umbral y que el último suceso que ocurra no sea un accidente grave.

Todas estas fórmulas mostradas fueron desarrolladas por Shao J. en 2015, en su tesis “Modelling Castrophe Risk Bonds”. Sin embargo, en este presente trabajo se busca generalizar las matrices de transición con W estados de tránsito y r estados absorbentes. Es por ello que se sigue el trabajo de Ayyub et al. 2016, “Towards resilience to nuclear accidents: Financing nuclear liabilities via catastrophe risk bonds” que posteriormente fue desarrollado por Shao J. et al. en 2017 en su trabajo “Nuclear Catastrophe Risk Bonds in a Markov Dependent Environment”.

3.5 TARIFICACIÓN

Hay muchos modelos diferentes para poder determinar el precio de los bonos catastróficos. En este trabajo se usará el modelo SM'/SM, el cual determina que el tiempo entre llegadas solo depende del estado actual en el que se encuentre el sistema. Por lo que el proceso irá cambiando de estado al entrar un nuevo siniestro, siguiendo la matriz de transición. La distribución de la severidad de los siniestros es dependiente del estado futuro, y el tiempo de espera para la llegada del próximo siniestro, U_n , dependerá de la severidad del evento actual, X_n . La estructura de pagos que sigue este cupón cero hipotético será la siguiente,

$$P_{CAT} = \begin{cases} Z & \text{para } L(T) \leq D \text{ y } J_N = W, \\ \eta_1 Z & \text{para } L(T) > D \text{ y } J_N = W, \\ \eta_2 Z & \text{para } J_N = O. \end{cases} \quad (42)$$

Donde D nos indica el valor del umbral predeterminado en el contrato, Z es valor nominal en el momento de vencimiento del bono, T , y $L(T)$ representa la pérdida total asegurada. Así, si $L(T)$ es mayor que el umbral predeterminado, y no ha ocurrido ningún accidente grave, evento del estado absorbente O , entonces el titular del bono perderá parte del capital y recibirá $\eta_1 Z$. En el caso de que sí ocurra un accidente nuclear grave antes de que expire el bono N-CAT en T , entonces el bono expirará de forma automática y el dueño del bono recibe una cantidad parcial del valor nominal del bono, $\eta_2 Z$. Siendo $\eta \in [0, 1)$ la fracción del valor nominal Z que los titulares de los bonos tendrán que pagar cuando ocurre un evento desencadenante. Siguiendo esta función de pagos, P_{CAT} , se obtiene que,

$$V(t) = B_{CIR}(t, T)Z[\eta_1 + (1 - \eta_1)F_1(T - t, D) + (\eta_2 - \eta_1)F_2(T - t, D)], \quad (43)$$

donde $V(t)$ es el valor en el momento t de un bono cupón cero catastrófico para riesgos nucleares, bajo probabilidad neutral al riesgo, siendo F_1 y F_2 las probabilidades definidas en las ecuaciones 38 y 39; y $B_{CIR}(t, T)$ representa el valor de los bonos mediante el modelo de tipos de interés CIR definido en las ecuaciones 8 a 12.

3.6 PROBABILIDADES DE INCIDENTES Y ACCIDENTES NUCLEARES

La industria nuclear es un área en la que existen importantes discrepancias a la hora de determinar la probabilidad de que ocurra un accidente (frecuencia), y la magnitud de estos potenciales daños (severidad). Esto en parte se debe a la complejidad de estos accidentes junto a que no existe una base de datos a nivel mundial de los accidentes nucleares, por lo que no existe información armonizada sobre este tipo de accidentes (Minh Ha-Doung, et al., 2014; Sovacool, S., 2017).

Por tanto, aunque se pueden encontrar informes de accidentes nucleares en las páginas web de AIEA (Agencia Internacional de Energía Atómica), no hay un directorio que incluya estadísticas de estos accidentes con información detallada. Además, AIEA no ofrece ninguna garantía sobre la certeza de la información que proporciona. Incluso en algunas ocasiones han sido criticados por ser incoherentes o solo publicar un número muy pequeño de incidentes (Sovacool, S., 2017).

Igualmente, en 2007, Kastchiev et al., estudiaron el historial de seguridad de las centrales nucleares, observando que muchos sucesos relacionados con la seguridad nuclear pasan totalmente desapercibidos por el público, pues se infravalora su potencial riesgo. Con todo ello, a día de hoy no existe ninguna otra entidad aparte de AIEA que ofrezca una mejor base de datos.

A pesar de estas limitaciones, ha habido muchos estudios que han intentado determinar la frecuencia de los incidentes y accidentes nucleares basándose en esta información disponible, pero estos se limitan a una serie de eventos concretos. Esto, añadido a la baja cuantía de datos que hay, causa que los estudios no sean concluyentes. Por ejemplo, Laponche y Dessus, en 2011, aseguraron que la probabilidad de que ocurra un accidente de nivel 7 en Europa en los próximos 30 años es del 100%. Sin embargo, basándose en los mismos datos, Ghys, en este mismo año, determinó que esta probabilidad es del 72%.

Uno de los métodos más populares para estimar las probabilidades de un accidente nuclear es, el “Probabilistic Risk Assessment” (PRA), el cual permite evaluar los riesgos e identificar posibles fallos de seguridad. Pero debido a la falta de conocimientos sobre los sucesos que inician los accidentes y todas las consecuencias que derivan de los mismos, este método aún está lejos de ser preciso. Las probabilidades que estima este modelo suelen ser poco realistas, subestimando notablemente la probabilidad de los accidentes nucleares (Minh Ha-Doung, et al., 2014; Sovacool, 2017).

Teniendo en cuenta todas estas limitaciones, para la realización de este trabajo se ha decidido crear una base de datos con 67 incidentes y accidentes nucleares calificados con niveles del 3 al 7 en la escala INES, desde 1951, que es la fecha en la que se empezó a usar la energía nuclear con fines civiles, hasta la actualidad. Esta muestra de datos, mostrada en la *Figura 19*, ha sido obtenida de la base de datos sobre accidentes nucleares

que publica IAEA (International Atomic Energy Agency), aunque como se ha explicado anteriormente, debido a la falta de una base de datos mundial estandarizada y a que la clasificación de los niveles del INES no es suficientemente precisa, los resultados obtenidos no son del todo fiables.

3	1975	Greifswald	Alemania	3	2007	Bilbao	España	4	1969	Vaud	Suiza
3	1989	Vandellós	España	3	2008	Toulouse	Francia	4	1969	Saint Laurent	Francia
3	1991	Bohunice	Eslovaquia	3	2008	Tarragona	España	4	1974	Leningrad	Rusia
3	1991	Smolensk	Rusia	3	2008	Hospital	Brasil	4	1975	Leningrad	Rusia
3	1991	Bilibino Gen	Rusia	3	2009	Jinju	Corea del Sur	4	1976	Jaslovske Bohunice	Eslovaquia
3	1991	Ignalina	Lituania	3	2009	Gdansk	Polonia	4	1980	Saint Laurent	Francia
3	1991	Khmelnitski	Ucrania	3	2011	Texas	EEUU	4	1982	Chernobil	Ucrania
3	1993	Narora	India	3	2012	Lima	Perú	4	1984	Buenos Aires	Argentina
3	1995	Tianjin	China	3	2013	Fukushima	Japón	4	1989	Greifswald	Alemania
3	1996	Jihua	China	3	2013	Cusco	Perú	4	1999	Ibaraki Prefecture	Japón
3	1997	Tokai	Japón	3	2013	Lingen	Alemania	4	2000	Meet Halfa	Egipto
3	1997	Treviso	Italia	3	2013	Tepojaco	México	4	2006	Fleurus	Bélgica
3	1999	Ikitelli	Turquía	3	2014	Ventanilla	Perú	4	2010	Otro	India
3	1999	Scrapyard	Turquía	3	2014	Chinchilla	Australia	4	2011	Stamboliysky	Bulgaria
3	2000	Channahon	EEUU	3	2014	Hospital	Suiza	5	1957	Cumberland	Reino Unido
3	2002	Davis Besse	EEUU	3	2015	Natanz	Iran	5	1977	Beloyarsk	Rusia
3	2002	Studsvik	Suecia	3	2015	Rio Turbio	Argentina	5	1979	Three Mile Island	EEUU
3	2002	Oak Harbor	EEUU	3	2017	New South Wales	Australia	5	1984	Ciudad de Juárez	México
3	2003	Paks	Hungría	3	2018	Khorasane Razavi	Iran	5	1987	Goiânia	Brasil
3	2004	Aibonito	EEUU	4	1961	Idaho Falls	EEUU	6	1957	Mayak	Rusia
3	2005	Atucha	Argentina	4	1966	Newport	EEUU	6	1959	Simi Valley	EEUU
3	2005	Sellafield	Reino Unido	4	1967	Chapelcross	Reino Unido	7	1986	Chernobil	Ucrania
								7	2011	Fukushima	Japón

Figure 19: Base de datos de accidentes nucleares 1951-2020. (Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos del directorio de INES)

Para determinar la frecuencia anual de accidentes se ha considerado que los accidentes que ocurren cada año son independientes entre sí y que la tasa media no cambia durante este periodo de tiempo estudiado. Es por ello que la distribución que más se ajusta para estudiar esta frecuencia de los siniestros, como ya hemos explicado anteriormente, es la Poisson. Así se obtienen los resultados mostrados en la *Figura 20*.

Nº accidentes por año	INES Nivel 3		INES Nivel 4		INES Nivel 5		INES Nivel 6		INES Nivel 7	
	Frecuencia Esperada	Probabilidad	Frecuencia Esperada	Probabilidad	Frecuencia Esperada	Probabilidad	Frecuencia Esperada	Probabilidad	Frecuencia Esperada	Probabilidad
0	26	56.01%	50	79.30%	62	94.37%	65	98.56%	65	98.56%
1	13	32.47%	15	18.39%	5	5.47%	2	1.43%	2	1.45%
2	5	9.41%	1	2.13%	0	0.16%	0	0.01%	0	0.00%
≥3	5	1.82%	0	0.16%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%

Figure 20: Probabilidades de accidentes nucleares. (Fuente: elaboración propia)

Estos datos nos indican la probabilidad de que ocurra uno, dos y tres o más de tres accidentes nucleares por año, diferenciando el tipo de accidente por los niveles INES.

3.7 CASO PRÁCTICO

En esta sección se realizará un ejemplo numérico sobre los bonos catastróficos para el riesgo nuclear, programado con el *software R*. En el sector asegurador, los emisores de estos bonos catastróficos, basándose en la situación en la que se encuentran, pueden determinar qué tipo de modelo es más apto para cada caso, pues dependiendo del modelo y distribución que sigan, el precio de un bono catastrófico puede variar de forma significativa. Sin embargo, debido a esta dificultad de encontrar datos sobre accidentes e incidentes nucleares, para el caso de los bonos N-CAT la selección de un modelo mejor está fuera de nuestro alcance.

Es por ello que para obtener los precios de los bonos N-CAT, en vez de aplicar fórmulas de fijación de precio al mundo real mediante el cálculo de la distribución exacta de las pérdidas agregadas, se usa el método de la simulación de Monte Carlo. Mediante este método se pueden analizar y aproximar los precios de los bonos N-CAT mediante cálculos numéricos, donde se asumen las distribuciones y los parámetros.

Consideramos que hay un estado absorbente O , que sería una explosión nuclear, cuatro estados en el periodo de tránsito que indican el trabajo del sistema W . Estos cuatro estados representan posibles incidentes y accidentes que pueden ocurrir en una central nuclear; ordenados de menor a mayor gravedad tenemos:

- Estado 1. Accidente de nivel 3 en la escala INES
- Estado 2. Accidente de nivel 4 en la escala INES
- Estado 3. Accidente de nivel 5 en la escala INES
- Estado 4. Accidente de nivel 6 en la escala INES³

Desde cada uno de estos 4 estados W se puede ir al resto de estados y a sí mismos. El estado O sería un fallo en el reactor nuclear, es decir un accidente de nivel 7 en la escala INE; si este tipo de accidente grave ocurre, el bono vence inmediatamente, es por ello que se trata de un estado absorbente, pues de este estado no se puede salir.

Para construir la matriz de transición, las probabilidades de los estados del trabajo del sistema, se calculan conforme a la base de datos mostrada en la *Figura 19*, y mediante la función “*markovchainFit*”, perteneciente al paquete de R “*markovchain*”⁴, se ajusta una cadena de Markov a la secuencia dada, usando el método de máxima verosimilitud. En la *ecuación 44* se muestra el método EML para el estado p_{ij} , donde n_{ij} se compone de la secuencia de números, $(X_t = s_i, X_{t+1} = s_j)$, de la muestra. (Spedicato et al. 2017),

³Para ver qué tipo de accidentes entra en cada uno de estos niveles, ver la *Figura 12*.

⁴Para más información sobre el funcionamiento de la función “*markovchainFit*”, consultar el trabajo de Spedicato et al. “The markovchain Package: A Package for Easily Handling Discrete Markov Chains in R” (2017).

$$\hat{p}_{ij}^{EML} = \frac{n_{ij}}{\sum_{u=1}^k n_{iu}}. \quad (44)$$

Por otro lado, para el estado absorbente, dada la improbabilidad del mismo y de que el bono se ejecutará automáticamente cuando el sistema entre en este estado, se considera que estas probabilidades deben ser ínfimas. Es por ello que se usa la frecuencia esperada para accidentes de nivel 7 calculadas en la *Figura 20*.

Así se obtiene la siguiente matriz de transición, $\mathbf{P} = (p_{ij})$,

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.82 & 0.17 & 0 & 0 & 0.014 \\ 0.4 & 0.4 & 0.18 & 0 & 0.014 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.014 \\ 0 & 0.49 & 0 & 0.49 & 0.014 \end{pmatrix}. \quad (45)$$

Y cuya distribución estacionaria será de: $(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4) = (0.6675, 0.2512, 0.0569, 0.02448)$, que se obtiene de resolver $\Pi \mathbf{P} = \Pi$, con $\sum_{i \in E} \Pi = 1$.

La primera fila de esta matriz de transición está formada por un uno y el resto ceros, p_{0j} , pues esto representa el estado absorbente, como ya se explicó anteriormente; en el caso de que ocurra un accidente grave nuclear, todo el sistema se parará, y los bonos N-CAT vencerán de forma automática. En la segunda fila, $p_{11} = 0.82$ se interpreta como la probabilidad de que ocurra un incidente de nivel 3 leve tras haber ocurrido ya uno. Y $p_{12} = 0.17$ representa la probabilidad de que ocurra un incidente de nivel 4 tras haber ocurrido ya un incidente de nivel 3, y así sucesivamente.

La distribución entre el tiempo de llegadas (frecuencia) sigue un proceso de Poisson, que viene dada por la matriz $G(t, \infty) = (G_{ij}(t, \infty), i \in J', j \in J)$,

$$G_{ij}(t, \infty) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - \exp^{-\lambda_i t}, & t \geq 0. \end{cases} \quad (46)$$

Al haber 4 estados deberemos elegir 4 lambdas aleatorios, $\lambda_i = 5, 10, 20, 25$, para $i = 1, 2, 3, 4$.

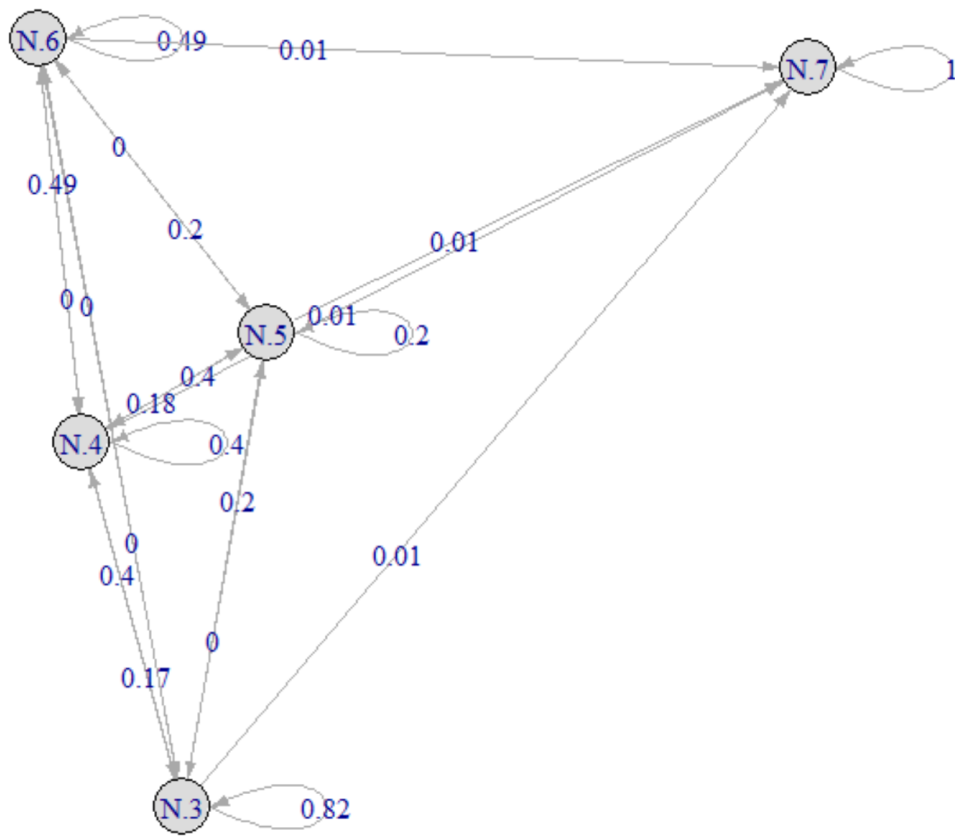


Figure 21: Diagrama de flujos entre estados. (Fuente: elaboración propia)

La severidad de los siniestros seguirá una distribución log-normal, pues las pérdidas de los accidentes catastróficos siguen distribuciones de cola pesada,

$$G_{ij}(\infty, t) = \frac{1}{x\sigma_j\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right), i \in J', j \in J. \quad (47)$$

De esta manera se asume de forma aleatoria que $\mu_j = 1, 1.5, 2, 2.5$ y $\sigma_j = 0.8, 1.2, 1.5, 1.9$, para $j = 1, 2, 3, 4$.

En este ejemplo numérico se considera también que los bonos N-CAT son bonos cupón cero, pues nos encontramos en un mundo de probabilidades neutrales y cuyo valor nominal, Z , será de 1000 euros. Respecto al vencimiento de los mismos se considerarán varias opciones, con vencimientos que van desde medio año hasta los dos años de duración, $T = [0.5, 2]$. Por otro lado, el nivel del umbral irá de $D = [100, 1500]$ expresado en millones de euros. Respecto a la función de la estructura de pagos que sigue este cupón, mostrada en la *ecuación 42*, se asume que $\eta_1 = 0.75$ cuando la pérdida agregada $L(T)$ supere el umbral de $D = [100, 1500]$, expresado en millones de euros, y $\eta_2 = 0.5$.

Por otro lado, y como ya se ha mencionado anteriormente en este trabajo, para estudiar la tasa de interés instantánea se utiliza el modelo CIR, cuyos parámetros son estimados mediante el método de máxima verosimilitud (EMV). Los inputs usados para este proceso son los bonos estadounidenses con vencimiento a 10 años, usando los datos históricos mensuales desde enero del 2000 hasta enero del 2020 (Investing, 2020). Así, se obtienen los siguientes valores:

- Tipo de interés a corto plazo $r_0 = 4.9186\%$
- Tipo de interés medio a largo plazo $\theta = 4.9186\%$
- Fuerza de reinversión media $k = 0.0382$
- Volatilidad $\sigma = 2.4832\%$

El precio de mercado del riesgo, λ_r , se asumirá que sigue una constante -0.01.

En la *Figura 22* se muestra el valor de los bonos catastróficos nucleares para riesgo nuclear con la función de pago P_{CAT} , mostrada en la *ecuación 42*, con unos niveles de umbral $D = [100, 1500]$, expresado en millones de euros, y unos vencimientos de $T = [0.5, 2]$ años, bajo los supuestos de tipo de interés estocásticos, donde la distribución de las pérdidas sigue una distribución logarítmica normal, y la severidad de los siniestros sigue un proceso de Poisson.

VALOR BONOS N-CAT(€)		DURACIÓN (AÑOS)			
		0.5	1	1.5	2
UMBRAL (M€)	100	779.81	395.10	395.10	327.37
	500	973.29	832.75	832.75	737.56
	1000	992.41	922.75	922.75	874.83
	1500	997.21	943.72	943.72	907.85

Figure 22: Valor de los bonos N-CAT con un valor nominal de 1000€. (Fuente: elaboración propia)

Observando estos datos obtenidos podemos observar que el valor de los bonos nucleares catastróficos disminuye conforme aumenta el tiempo de vencimiento. Además, aunque el nivel de umbral no afecta a la probabilidad de tener un accidente de mayor gravedad, a mayor nivel del umbral mayor será el valor de los bonos. También se aprecia que, conforme aumenta el nivel de umbral, el valor de los bonos tiende a estabilizarse. En la *Figura 23* se puede observar de forma más visual la evolución del valor de este bono.

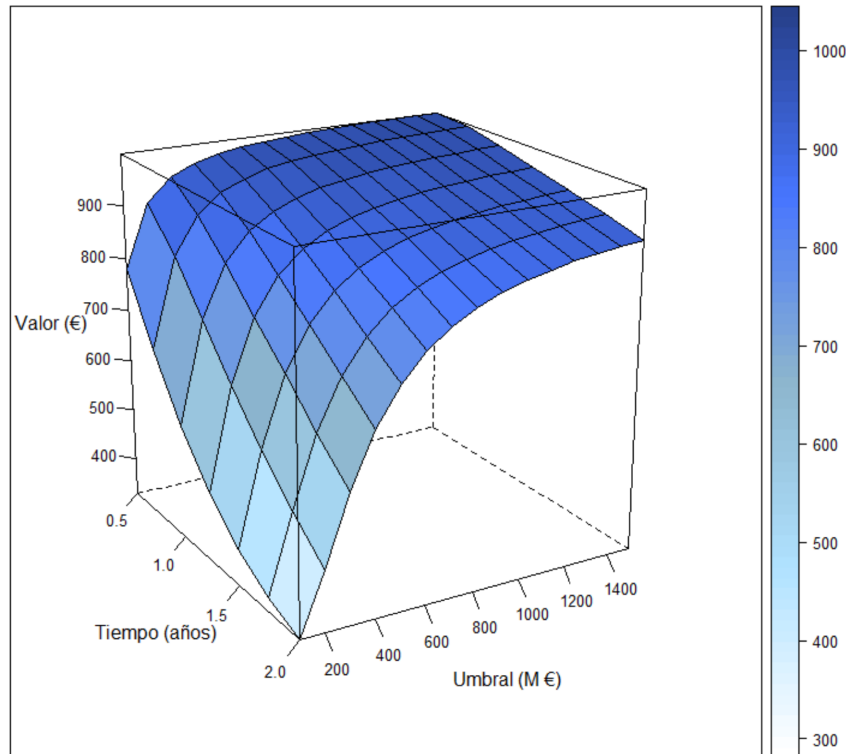


Figure 23: Representación gráfica del valor de los bonos N-CAT. (Fuente: elaboración propia)

Por último, mencionar que estos resultados y conclusiones obtenidos se encuentran en línea con los resultados obtenidos por Shao, J. et al. en el ensayo “Nuclear Catastrophe Risk Bonds in a Markov Dependent Environment” (2017).

3.8 RESUMEN

En este Capítulo III se ha presentado un bono catastrófico nuclear con un activador de dos coberturas, con el objetivo de financiar la responsabilidad nuclear que tiene los explotadores de la industria nuclear. Así, se añade al desencadenante por pérdida agregada, un desencadenante por ocurrencia. Para ello se añade un estado absorbente al sistema de reclamaciones, donde en caso de que un accidente grave de nivel 7 ocurra, el bono N-CAT vence de forma inmediata.

Para determinar el valor de los bonos N-CAT, se determinan una serie de supuestos: mercado libre de arbitraje, independencia entre los riesgos financieros y los riesgos de catástrofe, y la posibilidad de replicar los tipos de interés mediante instrumentos financieros existentes. Se usan así probabilidades neutrales al riesgo en vez de mundo real, y se fija el precio de los bonos mediante el uso de estructuras dependientes de semi-Markov en tiempo continuo donde el tiempo de llegada entre cada siniestro depende de la severidad de los siniestros, así como del modelo CIR de los tipos de interés y de la función de pago de dos coberturas.

Se usa también la simulación Monte Carlo, asumiendo las distribuciones y parámetros, para poder hacer los experimentos numéricos; este método tiene como principal desventaja su coste computacional, ya que el tiempo de cálculo es muy largo, sin embargo, es muy difícil encontrar métodos alternativos de aproximación que sean eficientes. Por otro lado, los valores de los bonos se obtienen mediante las hipótesis de log-normal, proceso de Poisson no homogéneo y los tipos de interés estocásticos para diferentes niveles de umbral y tiempo hasta el vencimiento.

De los resultados de este análisis numérico se observa que el precio de los bonos N-CAT decrece conforme el nivel de umbral aumenta, puesto que el tiempo hasta el vencimiento también aumenta. Debido a la falta de datos históricos, pues los eventos catastróficos causados por la industria nuclear son limitados, la estimación de los parámetros a usar en este modelo es todo un reto, el cual hace que la precisión del modelo para fijar los precios de los bonos sea difícil.

CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se proponen los bonos catastróficos nucleares (N-CAT) como un instrumento que potencialmente complementaría la cobertura de los riesgos de las centrales nucleares.

La energía nuclear crea probabilidades poco frecuentes de que se produzcan graves accidentes, pero cuando estas ocurren los daños a terceros son altamente costosos. El tradicional mercado de seguros no es capaz de manejar de forma competitiva los riesgos generados por la energía nuclear, pues solo son capaces de cubrir una pequeña fracción de los costes totales. Siendo, en última instancia, los Gobiernos los responsables de cubrir estos costes cuando se superan los 700 millones de euros.

Mediante los bonos N-CAT es posible transferir el riesgo de los accidentes nucleares al mercado financiero, cuya capacidad excede con creces a la del sistema actual de *pools*. Por consiguiente, estos bonos permitirían potencialmente eliminar la regulación actual que limita la responsabilidad de los explotadores de las centrales nucleares e incentivaría así las buenas prácticas en la implementación de los parámetros de seguridad. Estos bonos podrían ser emitidos tanto por las entidades aseguradoras, como por la propia industria nuclear o por los gobiernos.

Por todo esto, en este trabajo se presenta un método de valoración de los bonos N-CAT, que modela la relación entre la frecuencia y la severidad de los siniestros mediante el modelo de semi-Markov. Los dos factores clave que condicionan el valor de los bonos N-CAT son el nivel del umbral de activación y la duración del contrato. Así, cuanto menor sea el umbral y más largo sea el plazo de vencimiento, menor será el valor de los bonos. Por último, remarcar que este trabajo también sería aplicable para otro tipo de riesgos catastróficos.

En conclusión, los bonos N-CAT son una buena alternativa de transferencia de los riesgos nucleares que los gobiernos deberían estudiar en profundidad e implementar las medidas necesarias para que, en un futuro próximo, estos bonos puedan llegar a ser emitidos. Pues es ineludible poder cubrir de forma ilimitada todos los costes que puedan causar los accidentes nucleares, visto que, para bien o para mal, la energía nuclear nos va a acompañar por muchos años más.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Albrecher, H., Hartinger, J., y R. Tichy (2004). “Quasi Monte Carlo techniques pricing. Monte Carlo Methods and Applications”, 10:197–212
- [2] Amigos de la Tierra (2011). “Justicia Climática”. [online] URL < <https://www.tierra.org/el-movimiento-antinuclear-solicita-al-csn-que-sea-estricto-en-las-pruebas-de-resistencia-de-las-nucleares/> >
- [3] Aon Securities LLC. (2020). “ILS Annual Report 2020, Alternative Capital: Growth Potential and Resilience”. [online] URL < http://thoughtleadership.aon.com/documents/280920_aon_securities_ils_annual_2020_update.pdf >
- [4] Artemis (2014). “S&P affirms rating on 29 catastrophe bond tranches after annual resets”. [online] URL < <https://www.artemis.bm/news/sp-affirms-ratings-on-29-catastrophe-bond-tranches-after-annual-resets/> >
- [5] Artemis (2020) “What is collateralized (or collateralised) reinsurance?”. [online] URL < <https://www.artemis.bm/library/what-is-collateralized-reinsurance/> >
- [6] Ayyub, B. M., Pantelous, A. A., and Shao, J. (2016). “Towards resilience to nuclear accidents: Financing nuclear liabilities via catastrophe risk bonds.” ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering, 2(4), 041005: 1–9.
- [7] Baryshnikov, Y., Mayo, A., and Taylor, D. (2001). “Pricing of cat bonds”.
- [8] BBC News (2020). “Australia fires: A visual guide to the bushfire crisis”. [online] URL < <https://www.bbc.com/news/world-australia-50951043> >
- [9] BBC News (2021). “Fukushima: Japan approves releasing wastewater into ocean”. [online]. URL < <https://www.bbc.com/news/world-asia-56728068> >
- [10] Boucher, M. (2009). “Development in the insurance-linked securities (ILS) life market, post financial crisis.” East Asian Actuarial Conference. 14. Print.
- [11] Boulanenkov V. y Brads B. (1988). “Responsabilidad por daños nucleares: situación y perspectivas”. [online] IAEA Crónicas. URL < https://www.iaea.org/sites/default/files/30405380409_es.pdf >

- [12] Bowers Jr., N. L., Gerber, Hans U. and Hickman, J. C., Jones, D. A., and Nesbitt, C. J. (1986). 574 Actuarial Mathematics. 2nd edition, The Society of Actuaries, USA.
- [13] Boyd, J. (2011). “Modeling Fundamental: so you want to issue a cat bond”. [online] AIR Currents. URL < <https://www.air-worldwide.com/Publications/Presentations/attachments/Introduction-to-Catastrophe-Bond-Issuance/> >
- [14] Burgherr, P. y Hirschberg S. (2014). “Comparative risk assessment of severe accidents in the energy sector.” Energy Policy 74 (2014) S45–S56
- [15] Cadena Ser (2018). “ El Gobierno paraliza la construcción del ATC de Villar de Cañas”. [online] URL < https://cadenaser.com/emisora/2018/07/18/ser_cuenca/1531898795_150679.html >
- [16] Carazo, N. (2012). “¿Qué es la aceleración sísmica?”. [online] NC Arquitectura. URL < <https://ncarquitectura.com/que-es-la-aceleracion-sismica/> > [Consultado el 10 de abril de 2021].
- [17] Consejo de Seguridad Nacional. “Clasificación de residuos radioactivos”. Clasificación de residuos radioactivos. [online] URL < <https://www.csn.es/clasificacion-de-residuos-radioactivos> >
- [18] Consorcio de Compensación de Seguros (2021) “ Ámbitos de Actividad: otras actividades”. [online] Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital. . [online] NC Arquitectura. URL < <https://www.consorseguros.es/web/ambitos-de-actividad/otras-actividades/seguros-nucleares> >
- [19] Constitución Española, BOE núm. 311, de 29/12/1978. URL < [https://www.boe.es/eli/es/c/1978/12/27/\(1\)/con](https://www.boe.es/eli/es/c/1978/12/27/(1)/con) >
- [20] Cox, J. C., Ingersoll Jr, J. E., and Ross, S. A. (1985). “A theory of the term structure of interest rates.” *Econometrica*, 53(2), 385–407.
- [21] Cox, S. H., and Pedersen, H. W. (2000). “Catastrophe risk bonds”. *North American Actuarial Journal*, 4(4), pp. 56–82.
- [22] Cummins, J. D. (2012). “CAT bonds and other risk-linked securities: product design and evolution of market”. *The Geneva Association*, no. 5, March 2012, pp 39-61, disponible en SSRN 1997467.
- [23] Cummins, J. D. (2008). “CAT bonds and other risk-linked securities: state of the market and recent developments”. *Risk Management and Insurance Review*, Vol. 11, No. 1, pp 23-47.

- [24] Dassios and J. W. Jang (2003). “Pricing of catastrophe reinsurance and derivatives using the Cox process with shot noise intensity”. *Finance and Stochastics*, 7:73–95.
- [25] David Lochbaum (2020). “Nuclear Plants Risk Studies: Failing the grade”. Union of concerned scientists report.
- [26] Delbaen, F., and Schachermayer, W. (1994). “A general version of the fundamental theorem of asset pricing”. *Mathematische annalen*, 300(1), pp. 463–520.
- [27] Dieckmann, S. (2011). “A Consumption-Based Evaluation of the Cat Bond Market”. Working Paper, Wharton School, University of Pennsylvania, Philadelphia.
- [28] EIA (2021). “What is U.S. electricity generation by energy source?” Frequently Asked Questions (FAQs)
- [29] El Economista (2021). “Bill Gates y Warren Buffett cambiarán”las reglas del juego de la energía" con un proyecto nuclear de 1.000 millones de dólares". *Empresas y Finanzas* [online] URL < <https://www.economista.es/empresas-finanzas/noticias/11254884/06/21/Bill-Gates-y-Warren-Buffett-cambiaran-las-reglas-del-juego-de-la-energia-con-un-proyecto-nuclear-de-1000-millones-de-dolares.html> >
- [30] Emani (2020). “Welcome to the EMANI website”. [online] URL < <https://www.emani.be/page.php?pagina=33> >
- [31] Encyclopedia of Mathematics (2020). “Semi-Markov process” . [online] URL < http://encyclopediaofmath.org/index.php?title=Semi-Markov_process&oldid=48652 >
- [32] Europapress (2021). “El imán más potente del mundo, listo para el reactor de fusión ITER” *Cienciaplus*. [online] URL < <https://www.europapress.es/ciencia/laboratorio/noticia-iman-mas-potente-mundo-listo-reactor-fusion-iter-20210615173134.html> >
- [33] Evans, S. (2021). “Catastrophe bonds “gained in importance” in 2020, says Fitch”. [online] *Artemis*. URL < <https://www.artemis.bm/news/catastrophe-bonds-gained-in-importance-in-2020-says-fitch/#:~:text=Catastrophe%20bonds%20became%20more%20important,increase%2C%20Fitch%20Ratings%20has%20said.> >
- [34] Evans, S. (2021). “Life ILS outlook positive despite Covid-19, says Securis’ Luca Tres”. [online] *Artemis*. URL < <https://www.artemis.bm/news/life-ils-outlook-positive-despite-covid-19-says-securis-luca-tres/> >

- [35] Faure, M. G. y Van Den Bergh, R. (1995) “Liability for Nuclear Accidents in Belgium from an Interest Group Perspective”. *International Review of Law and Economics*, 10.
- [36] Faure, M. G. y Fiore, K. (2008) “The coverage of the nuclear risk in Europe: which alternative?” *The Geneva Papers*, 33 (8228-332). The International Association for the Study of Insurance Economics 1018-5895/08
- [37] Florin, F. y Emilia, C. (2014) “Characteristics of Nuclear Risk Insurances”. *Ovidius, University Annals, Economic Sciences Series Volume XIV, Issue 1 /2014*
- [38] Fitch Ratings (2020). “Mortgage Insurance-Linked Notes Are a Growing Source of Capacity (U.S. Mortgage Insurers Increase Usage)”. [online] Special Report. URL < <https://www.fitchratings.com/research/insurance/mortgage-insurance-linked-notes-are-growing-source-of-capacity-us-mortgage-insurers-increase-usage-16-10-2020> >
- [39] Foro Nuclear (2021). “Energía nuclear en España”. [online] Foro de la Industria Nuclear en España. URL < <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/energia-nuclear-en-espana/> >
- [40] Froot, K. A. (2001). The market for catastrophe risk: a clinical examination. *Journal of Financial Economics*, 60(2):529–571.
- [41] Fundación Laka (2020). “IAEA-database of nuclear and radiological incidents” URL < <https://www.laka.org/docu/ines/> >
- [42] Galeotti, M., Gürtler, M., and Winkelvos, C. (2012). “Accuracy of Premium Calculation Models for CAT Bonds - an Empirical Analysis”. *Journal of Risk and Insurance*, doi: 10.1111/j.1539- 6975.2012.01482.x.
- [43] Gallin, L. (2020). “COVID has proven the resilience of cat bonds: Ruoff, Schroder Secquaero”. [online] Artemis. URL < <https://www.artemis.bm/news/covid-has-proven-the-resilience-of-cat-bonds-ruoff-schroder-secquaero/> >
- [44] Gómez del Campo. “Los riesgos nucleares y su cobertura aseguradora”. [pdf] Mapfre, financiación y seguro. URL < https://app.mapfre.com/documentacion/publico/es/catalogo_imagenes/grupo.do?path=1016528 >

- [45] GFDRR (2013). “Mexico MutiCat Bond - Transferring Catastrophe Risk to the Capital Market” [pdf] Disaster risk financing and insurance case study URL < <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/22422/Mexico000Multi00the0capital0markets.pdf?sequence=1&isAllowed=y> >
- [46] Greenpeace (2017). “Accidentes”. [online] Archivo Greenpeace. URL < <http://archivo-es.greenpeace.org/espana/es/Trabajamos-en/Fin-de-la-era-nuclear/Accidentes/> >
- [47] Guía Jurídicas (2021). “Energía Nuclear”. [online] URL < https://guiasjuridicas.wolterskluwer.es/Content/Documento.aspx?params=H4sIAAAAAAAAAEAMtMSbF1jTAAAUMjUzMLtbLUouLM_DxbIwMDCwNzA7BAZlqlS35ySGVBqm1aYk5xKgDwgxO_NQAAAA==WKE >
- [48] Harrington, S. E., and Niehaus, G. (2003). “Capital, Corporate Income Taxes, and Catastrophe Insurance”. *Journal of Financial Intermediation*, 12: 365-389.
- [49] Harrison, J. M. and Kreps, D. M. (1979). “Martingales and arbitrage in multiperiod securities markets”. *Journal of Economic theory*, 20(3):381-408.
- [50] Hills, A. (2010). “Cat bond market develops new collateral trends”. [online] Reuters. URL < <https://www.reuters.com/article/us-catbonds-collateral-analysis-idUSTRE60P3RC20100126> >
- [51] IEA (2020). “Nuclear Power in a Clean Energy System”. [online] Report. URL < <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system> >
- [52] IAEA International Atomic Energy Agency (2021). “Joint Protocol Relating to the Application of the Vienna Convention and the Paris Convention” [online] Report. URL < <https://www.iaea.org/topics/nuclear-liability-conventions/joint-protocol-relating-to-application-of-vienna-convention-and-paris-convention> > .
- [53] INESE (2017). “El pool nuclear proporciona una capacidad aseguradora global y de calidad”. [online] Noticias. URL < <https://www.inese.es/el-pool-nuclear-proporciona-una-capacidad-aseguradora-global-y-de-calidad/> >
- [54] Investing (2020). “Rentabilidad del bono Estados Unidos 10 años”. [online] < <https://es.investing.com/rates-bonds/u.s.-10-year-bond-yield> >
- [55] Instituto Geográfico Nacional (2021). “Terremotos más importantes en España”. [online] Centro Nacional de Información Geográfica, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. URL < <https://www.ign.es/web/ign/portal/terremotos-importantes> >

- [56] Insurance Information Institute (2012). “Hurricane Andrew and insurance: the enduring impact of an historic storm”. Autor: Lynne McChristian , Florida Representative
- [57] Insurance Information Institute (2015). “Alternative capital and its impact on insurance and reinsurance markets”. Autor: Robert P. Hartwig, President and Economist and James Lynch, Chief Actuary and Director of Information Services
- [58] Janssen, J. (1969). Les processus (jx). “Cahiers du CERO”. 11(1969):181–214.
- [59] Janssen, J., (1980). “Some transient results on the M/SM/1 special Semi-Markov model in risk and queueing theories”. Astin Bulletin, 11:41–51.
- [60] Janssen, J. and Manca, R., (2007). “Semi-Markov risk models for finance, insurance and reliability”.Springer.
- [61] Pastor, J. (2021). “China presume de”sol artificial“: su reactor de fusión nuclear alcanza los 120 millones de grados durante 101 segundos”. Xataka [online] URL < <https://www.xataka.com/energia/china-presume-sol-artificial-su-reactor-fusion-nuclear-alcanza-120-millones-grados-durante-101-segundos> >
- [62] Jonsson, F. G. (2014). “Analysis and Optimization of a Portfolio of Catastrophe Bonds”. Master’s Thesis in Mathematical Statistics.
- [63] Jarrow, R. A. (2010). “A simple robust model for cat bond valuation”. Finance Research Letters, 7(2):72–79.
- [64] Kasi (2020). “Advantages and Disadvantages of Catastrophe Bonds”. [online] MBA Tutorials URL < <https://mba-tutorials.com/advantages-and-disadvantages-of-catastrophe-bonds/> >
- [65] Kastchiev G., Kromp W., Kurth S., Lochbaum D., Lyman E., Sailer M. y Schneider M. (2007), “Residual risk, An Account of Events in Nuclear Power Plants Since the Chernobyl Accident in 1986”
- [66] Kladviko, K. (2007). “Maximum likelihood estimation of the Cox-Ingersoll-Ross process: the matlab implementation”.Tech. report, Technical Computing Prague.
- [67] Laponche B.y Dessus B. (2011). “Accident nucléaire : une certitude statistique”. Libération.

- [68] La Vanguardia (2021). “Barcelona acoge a uno de los centros para desarrollar la energía de fusión”. [online] URL < <https://www.lavanguardia.com/vida/20210614/7528514/barcelona-acogera-centros-desarrollar-energia-fusion.html> >
- [69] Lee, J.-P. and Yu, M.-T. (2002). “Pricing default-risky cat bonds with moral hazard and basis risk”. *Journal of Risk and Insurance*, 69(1):25–44.
- [70] Ley 25/1964 de 29 de abril, sobre energía nuclear, BOE núm. 107, de 4 de mayo de 1964, páginas 5688 a 5696. URL < <https://www.boe.es/eli/es/1/1964/04/29/25> >
- [71] Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear. BOE núm. 100, de 25 de abril de 1980, páginas 8967 a 8971. URL < <https://www.boe.es/eli/es/1/1980/04/22/15> >
- [72] Ley 12/2011, de 27 de mayo, sobre responsabilidad civil por daños nucleares o producidos por materiales radiactivos. BOE núm. 127, de 28 de mayo de 2011, páginas 52951 a 52975. URL < <https://www.boe.es/eli/es/1/2011/05/27/12> >
- [73] Lin, Y. and Cox, S. H. (2005). “Securitization of mortality risks in life annuities”. *Journal of risk and Insurance*, 72(2):227–252.
- [74] Louwagie, J. (2014). “Five Index Trigger Benefits for Catastrophe Bond Sponsors”. *Versik, Property Claim Services*.
- [75] McGrath, M. (2021) “Nuclear energy: Fusion plan backed by Jeff Bezos to be built in UK”. *BBC News, Science*. [online] URL < <https://www.bbc.com/news/science-environment-57512229> >
- [76] Marx, B. (2020) “Hard Market vs. Soft Market: The Insurance Industry’s Cycle and Why We’re Currently in a Hard Market”. [online] *PSA Insurance and Financial Services*. URL < <https://www.psafinancial.com/2013/01/hard-market-vs-soft-market-the-insurance-industrys-cycle-and-why-were-currently-in-a-hard-market/> >
- [77] Méndez, R. (2011). “Zapatero culmina su viraje nuclear y acepta prolongar las centrales”. *El País*. URL < https://elpais.com/diario/2011/02/16/sociedad/1297810803_850215.html >
- [78] Michel-Kerjan, E. and Marcellis-Warin, N. (2006). “Public-private programs for covering extreme events: The impacts of information distribution and risk sharing”. *Asia-Pacific Journal of Risk and Insurance* 1(2): 21–49.

[79] Miller, H. D. (1962). “Absorption probabilities for sums of random variables defined on a finite markov chain”. In Proc. Cambr. Phil. Soc, volume 58, pages 286–298. Cambridge Univ Press.

[80] Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico MITECO (2021). “Responsabilidad civil por daños nucleares.” [online] URLt: < <https://energia.gob.es/nuclear/Compromisos/Paginas/responsabilidadcivil.aspx> >

[81] Minh Ha-Duong y V. Journé (2014). “Calculating nuclear accident probabilities from empirical frequencies. Environment Systems and Decisions”. Springer, 34 (2), pp.249-258.

[82] Murphy, C. B. (2020). “Catastrophe Bond”. [online] Investopedia. URL < <https://www.investopedia.com/terms/c/catastrophebond.asp> >

[83] Nabalia Energía (2018). “Los siete accidentes nucleares más importantes de la historia” . [online]URL < <https://nabaliaenergia.com/accidentes-nucleares-importantes-historia/> >

[84] NAIC, National Association of Insurance Commissioners (2020). “Insurance Linked Securities” . [online] The Center of Insurance Policy and Research. URL < https://content.naic.org/cipr_topics/topic_insurance_linked_securities.htm >

[85] Nowak, P. and Romaniuk, M. (2013). “Pricing and simulations of catastrophe bonds”. Insurance: Mathematics and Economics, 52(1):18–28.

[86] Nuclear Risk Insurers (2020). “Nuclear Pools: Ho does Nuclear Insurance work?”. [online] URL < <https://www.nuclear-risk.com/nuclear-pools/#:~:text=How%20does%20Nuclear%20Insurance%20work%3F&text=Reciprocation> >

[87] Parlamento Europeo (2020) “ La energía nuclear”. [online] Fichas temáticas sobre la Unión Europea URL < <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/62/la-energia-nuclear> >

[88] Pelsser, A. (2008). “On the applicability of the wang transform for pricing financial risks”. Astin Bulletin, 38(1):171.

[89] Pelzer, N. (2007). “International pooling of operators’ funds: An option to increase the amount of financial security to cover nuclear liability?”. Nuclear Law Bulletin 79: 37–55

- [90] Perfil (2021). “El misterio de Taishan: qué pasó en la central nuclear china que preocupa a Occidente”. Riesgos Atómicos. [online] URL < <https://www.perfil.com/noticias/actualidad/el-silencio-de-taishan-que-paso-en-la-central-nuclear-que-china-que-preocupa-a-occidente.phtml> >
- [91] Planetmath (2011). “Filtered probability space”. [online] URL < <https://planetmath.org/filteredprobabilityspace> >
- [92] Polacek, A. (2018). “Catastrophe bonds: A primer and retrospective”. [online] Chicago Fed Letter, The Federal Reserve Bank of Chicago. URL < <https://www.chicagofed.org/publications/chicago-fed-letter/2018/405> >
- [93] Radetzki M. and Radetzki M. (2000). “Private Arrangements to Cover Large-scale Liabilities Caused by Nuclear and Other Industrial Catastrophes”. The Geneva Papers on Risk and Insurance Vol. 25 No. 2 (April 2000) 180-195
- [94] Real Decreto 1952/2000, de 1 de diciembre, por el que se aprueba el Estatuto del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). BOE núm. 289, de 02/12/2000. URL < <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2000-21833> >
- [95] Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos. BOE núm. 58, de 8 de marzo de 2014, páginas 22069 a 22082. URL < <https://www.boe.es/eli/es/rd/2014/02/21/102> >
- [96] Reitsma M.S (2000). “Nuclear Insurance Pools: World-wide Practice and Perspective” IAEA Collection
- [97] Rincón J. (2017) “ 50 aniversario del Pool Atómico Español”. [online] INESE < <https://www.inese.es/50-aniversario-del-pool-atomico-espanol/> >
- [98] Sawla, S. (2018). “Parametric Insurance and Blockchain: a new dimension to ever young Insurance Industry”. [online] Srishti < <https://medium.com/@srishtisawla/parametric-insurance-blockchain-a-new-dimension-to-the-ever-young-insurance-industry-53a26c0d4c79> >
- [99] Schweizer, M. (1995). “On the minimal martingale measure and the mollmer-schweizer decomposition”. Stochastic analysis and applications, 13(5):573–599.
- [100] Shao, J., Pantelous, A, Ayyub, B, Chan, S & Nadarajah, S. (2017). “Nuclear Catastrophe Risk Bonds in a Markov Dependent Environment”, ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, vol 3, no. 4

- [101] Shao, J., Pantelous, A., Papaioannou, A. D. (2015). “Catastrophe risk bonds with applications to earthquakes”. *European Actuarial*, 113-138
- [102] Sinai D. (2010) “Secondary perils – Not so secondary”. [online] Swiss Re. URL < <https://www.swissre.com/risk-knowledge/mitigating-climate-risk/natcat-2019/secondary-perils-not-so-secondary.html> >
- [103] Sovacool, B.K., Wheatley, S. y Sornette, D.(2015). “Of Disasters and Dragon Kings: A Statistical Analysis of Nuclear Power Incidents & Accidents”
- [104] Sovacool, B.K. (2008). “The cost of failure: A preliminary assessment of major energy accidents, 1907-2007.” *Energy policy* 36 (2008) 1802-1820
- [105] Spedicato, G.A., Kang, T.S., Yalamanchi, S.B., Yadav, D., Cerdón, I. (2017) “The markovchain Package: A Package for Easily Handling Discrete Markov Chains in R”
- [106] Wheatley, S., Sovacool, B., y Sornette, D. (2017) “Of Disasters and Dragon Kings: A Statistical Analysis of Nuclear Power Incidents and Accidents”. *Risk Analysis*, Vol. 37, No. 1.
- [107] Statista (2021) “Operable nuclear reactors worldwide 2020, by country”. [online] URL < <https://www.statista.com/statistics/267158/number-of-nuclear-reactors-in-operation-by-country/> >
- [108] Swiss Re (2011). “The fundamentals of insurance-linked securities”. [online] Transforming insurance risk into transparent and tradable capital market products. URL < <https://www.swissre.com/our-business/alternative-capital-partners/ils-the-fundamentals-of-insurance-linked-securities.htm> > [Consultado el 10 de marzo de 2021].
- [109] Swiss Re (2018). “What is parametric insurance?” [online] URL < https://corporatesolutions.swissre.com/insights/knowledge/what_is_parametric_insurance.html >
- [110] Swiss Re (2020). “Swiss Re Institute estimates USD 83 billion global insured catastrophe losses in 2020, the fifth-costliest on record”. URL < <https://www.swissre.com/media/news-releases/nr-20201215-sigma-full-year-2020-preliminary-natcat-loss-estimates.html> >
- [111] The Economic Times (2015). “Indo-US nuclear deal: India may throw in sovereign guarantee” *Business News* . [online] Press Release. URL < [Indo-US nuclear deal: India may throw in sovereign guarantee - The Economic Times \(indiatimes.com\)](https://www.economictimes.com/Indo-US-nuclear-deal-India-may-throw-in-sovereign-guarantee) >

- [112] The World Bank (2009). “World Bank Launches Multicat Program”. [online] Press Release. URL < <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2009/10/19/world-bank-launches-multicat-program> >
- [113] Tyran, J.R. y Zweifel, P. (1993). “Environmental Risk Internalization through Capital Markets (ERICAM): The Case of Nuclear Power”, *International Review of Law and Economics*, 3, pp. 431-444.
- [114] Unwin J. (2019) “ Nuclear power: the pros and cons of the energy source: What are the pros and cons of nuclear power? Power-technology.com weighs up opinions on the controversial source of energy”. [online] Power Technology, Analysis. URL < <https://www.power-technology.com/features/nuclear-power-pros-cons/> >
- [115] Vaugirard, V. E. (2003). “Pricing catastrophe bonds by an arbitrage approach”. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 43(1):119–132.
- [116] Wang, S. S. (2004). Cat bond pricing using probability transforms. *Geneva Papers: Etudes et Dossiers, special issue on Insurance and the State of the Art in Cat Bond Pricing*, 278:19–29.
- [117] Wetterstein, P. (1990). “Damage from International Disasters in the Light of Tort and Insurance Law, with an Appendix on State Liability for Transboundary Environmental Damage by Professor Allan Rosas, in collaboration with Professor Zdzislaw Brodecki”, *General Reports for Association Internationale du Droit des Assurances (AIDA)*
- [118] World Nuclear Association (2020). “World Energy Needs and Nuclear Power”. [online] URL < <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx> >
- [119] World Nuclear Association (2020). “Nuclear Energy and Sustainable Development”. [online] URL < <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/nuclear-energy-and-sustainable-development.aspx>
- [120] World Nuclear Association (2021). “Nuclear Power in the World Today”. [online] URL < <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx> >
- [121] World Nuclear Association (2021). “Liability for Nuclear Damage”. [online] URL < <https://world-nuclear.org/focus/fukushima-daiichi-accident/liability-for-nuclear-damage.aspx> >

- [122] World Nuclear Association (2021). “The Many Uses of Nuclear Technology”. [online] URL < <https://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/overview/the-many-uses-of-nuclear-technology.aspx> >
- [123] World Nuclear News (2020). “Nuclear power can speed progress in the developing world”. [online] URL < <https://world-nuclear-news.org/Articles/Nuclear-power-can-speed-progress-in-the-developing> >
- [124] World Nuclear News (2021). “Study examines nuclear liability insurance market”. [online] URL < <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Study-examines-nuclear-liability-insurance-market> >
- [125] World Nuclear News (2021). “Pilot Natrium plant to be built in Wyoming” [online] URL < <https://world-nuclear-news.org/Articles/Pilot-Natrium-plant-to-be-built-in-Wyoming> >
- [126] World Nuclear Association (2020). “Three Mile Island Accident”. [online] URL < <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/three-mile-island-accident.aspx#:~:text=The%20TMI%2D2%20clean%2Dup,and%20cost%20approximately%20%24973%20million.> >
- [127] Wu, H. y Skogh, G. (2005). “The diversification theorem restated: Risk-pooling without assignment of probabilities”. *Journal of Risk and Uncertainty* 31: 35–51
- [128] Zimbidis, A. A., Frangos, N. E., and Pantelous, A. A. (2007). “Modeling earthquake risk via extreme value theory and pricing the respective catastrophe bonds”. *ASTIN Bulletin*, 37(1), pp. 163–184.

ANEXO - CÓDIGO EN R

```
# CÓDIGO EN R PARA BONOS NUCLEARES CATASTRÓFICOS #

start.time <- Sys.time()

library(readxl)
library(markovchain)
library(Matrix)
library(reshape2)
library(reshape2)
library(lattice)

data_1 = read_excel("C:/Users/Silvia/TFM/data.xlsx", col_names = FALSE)
data_2 = read_excel("C:/Users/Silvia/TFM/bonos.xlsx", col_names = FALSE)
data_3 = read_excel("C:/Users/Silvia/TFM/accidentes.xlsx",
                    range = "A1:A67",
                    col_names = FALSE)

##### 1. VALORES #####

## CARGAMOS LOS DATOS

# Frecuencia
lambda_poisson = matrix(c(5,10,20,25), nrow = 4) # Lambda del proceso de poisson para cada estado

# Severidad
mu_lognormal = matrix(c(1,1.5,2,2.5), nrow = 4)
sigma_lognormal = matrix(c(0.8,1.2,1.5,1.9)) # Mu y sigma del proceso de log normal para cada estado

# Probabilidad estacionaria

seq = c(data_3[1])

matriz = markovchainFit(data = seq, method = "mle")
matriz_1 = matriz$estimate
```



```

matriz_2 = matrix(c(0),
                  ncol = dim(matriz_1),
                  nrow = dim(matriz_1))

colnames(matriz_2) = c("Nivel 3", "Nivel 4",
                      "Nivel 5", "Nivel 6", "Nivel 7")
rownames(matriz_2) = c("Nivel 3", "Nivel 4",
                      "Nivel 5", "Nivel 6", "Nivel 7")

# El estado 7 es absorbente, cambiamos sus probabilidades

for (i in 1: dim(matriz_1)-1){
  for (j in 1:dim(matriz_1)){
    matriz_2[i,j] = round(matriz_1[i,j],3)

    # Añadimos el estado absorbente
    matriz_2[dim(matriz_1),j] = 0
    matriz_2[dim(matriz_1),dim(matriz_1)] = 1
  }
}

(matriz_transicion = matriz_2)

# Sustituimos los 0 por 0.001
Inicio = matrix(c(0,0,0,0,1), nrow = 1)
P_estado_J = array(c(0.817,0.4045,0.1965,0.001,0.167,
                    0.4045,0.3965,0.492,0.001,0.176,
                    0.1965,0.001,0.001,0.001,0.1965,0.492),
                  dim = c(4,4))
P_estado_0 = array(c(0.014, 0.014, 0.014, 0.014), dim = c(4,1))

matrix_transicion = cbind(P_estado_J, P_estado_0)
matriz_transicion = rbind(matrix_transicion, Inicio)

tm = matriz_transicion

```

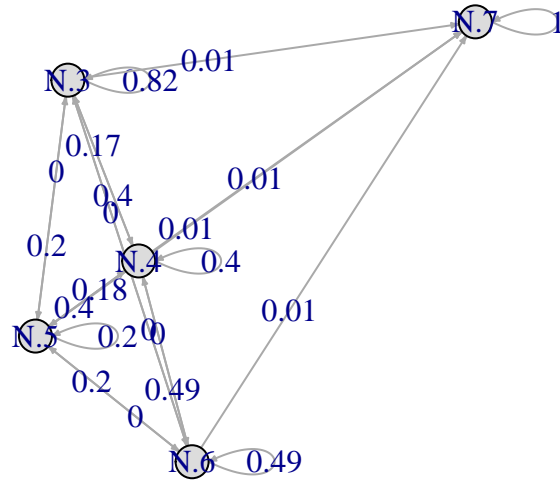
```
states = c("N.3", "N.4",  
           "N.5", "N.6", "N.7")  
library(markovchain)
```

```
## Package: markovchain  
## Version: 0.8.5-4  
## Date: 2021-01-07  
## BugReport: https://github.com/spedygiorgio/markovchain/issues
```

```
(mc = new("markovchain",  
          transitionMatrix=matriz_transicion,  
          states=states,  
          name="MarkovChain P"))
```

```
## MarkovChain P  
## A 5 - dimensional discrete Markov Chain defined by the following states:  
## N.3, N.4, N.5, N.6, N.7  
## The transition matrix (by rows) is defined as follows:  
##      N.3   N.4   N.5   N.6   N.7  
## N.3 0.8170 0.1670 0.0010 0.0010 0.014  
## N.4 0.4045 0.4045 0.1760 0.0010 0.014  
## N.5 0.1965 0.3965 0.1965 0.1965 0.014  
## N.6 0.0010 0.4920 0.0010 0.4920 0.014  
## N.7 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 1.000
```

```
plot (mc, edge.arrow.size = 0.2,  
      vertex.color = "gainsboro",  
      arrow.size = 10000,  
      edge.arrow.size = 100)
```



```
# Distribución estacionaria:
```

```
P_estacionaria <- Re(eigen(t(P_estado_J))$vectors[, 1])
(d_estacionaria = P_estacionaria / sum(P_estacionaria))
```

```
## [1] 0.66746748 0.25118015 0.05687100 0.02448138
```

```
# Tiempo - vencimiento del bono
```

```
t = seq(from = 0.5, to = 2, length = 7)
```

```
# Umbral
```

```
D = seq(from = 100, to = 1500, length.out = 15)
```

```
# Creamos un vector con todas las combinaciones posibles entre el tiempo y el umbral
```

```
combo = data.frame(expand.grid(t, D))
```

```
colnames(combo) = c('t', 'D')
```

```
tau = combo$t #tau...(T-t), tiempo de vencimiento
```

```

# Calculamos la función F_1(t,D) y F_2(t,D)

F1 = c()
F2 = c()

n_t = as.numeric(data_1[1,])
n_s = as.numeric(data_1[2,])

# length(combo$D), número de datos que obtendremos

for(n_repeticiones in 1:length(combo$D)){

  ## MATRIZ DE PROBABILIDAD CONDICIONAL DEL TIEMPO DE ESPERA ENTRE SINIESTROS

  T = combo[n_repeticiones,1]

  run_t = round(T/0.0002, 0) # pasos de dt
  run_tt = run_t*2+1
  select_t = seq(2, run_tt, by = 2)
  t_prima_1 = seq(1, run_tt, by = 2)
  t = seq(from = 0, to = T, length.out = run_tt)
  t_prima = t[t_prima_1] # t'
  t = t[select_t] # t

  #

  t_G = matrix(c(rep(0, length(t)*4)), nrow = 4)
  t_dG = matrix(c(rep(0, length(t_prima)*4)), nrow = 4)
  G_t = array(NA,dim=c(4, 4, run_t))
  dG_t = array(NA,dim=c(4, 4, run_t))

  for (i in 1:4){
    t_G[i,] = pexp(t, rate = lambda_poisson [i,], lower.tail = TRUE,log.p = FALSE)
    t_dG[i,]=pexp(t_prima, rate = lambda_poisson[i,], lower.tail = TRUE, log.p = FALSE)
    # pexp: función de distribución acumulada para exponencial
  }
}

```

```

}
for (i in 1:4){
  for (j in 1:4){
    G_t[j,i,] = t_G[j,]
    dG_t[j,i,] = diff(t_dG[j,])
    # la función diff hace la diferencia entre cada número
  }
}

# Fórmula Q_ij
Q_t = array(P_estado_J,dim=c(4, 4, run_t)) * G_t
dQ_t = array(P_estado_J,dim=c(4, 4, run_t)) * dG_t

## MATRIZ DE PROBABILIDAD CONDICIONAL DE LA SEVERIDAD DE LOS SINIESTROS

D = combo[n_repeticiones, 2]

run_s = round(D/0.5, 0)
run_ss = run_s*2+1
select_x = seq(2, run_ss,by = 2)
d_prima_1 = seq(1, run_ss,by = 2)
d = seq(from = 0,to = D, length.out = run_ss)
d_prima = d[d_prima_1]
d = d[select_x]

#

s_G = matrix(c(rep(0, length(d)* 4 )), nrow = 4)
s_dG = matrix(c(rep(0, length(d_prima)* 4 )), nrow = 4)
G_s = array(NA, dim=c(4, 4, run_s))
dG_s = array(NA, dim = c(4, 4, run_s))

for (i in 1:4){
  s_G[i,] = plnorm(d,mu_lognormal[i,],sigma_lognormal[i,])
  s_dG[i,] = plnorm(d_prima, mu_lognormal[i,], sigma_lognormal[i,])
}

```

```

# plnorm: función de distribución de la log normal
}

for (i in 1:4){
  for (j in 1:4){
    G_s[i,j,] = s_G[j,]
    dG_s[i,j,] = diff(s_dG[j,])
  }
}

Q_s = array(P_estado_J,dim=c(4, 4, run_s)) * G_s
dQ_s = array(P_estado_J,dim=c(4, 4, run_s)) * dG_s

H = array(NA, dim = c(1, 4, run_t))

# pexp: función de distribución de la poisson
for (i in 1:4){
  H[1,i,] = pexp(lambda_poisson[i,] * t)
}

### TIEMPOS DE CONVOLUCIÓN

## n = 0

N_0 = array(0, dim = c(4, 4)) # definimos el estado J'
N = N_0
F_2_0 = array(0, dim = c(4, 1)) # vamos del estado i al 0

F_2 = F_2_0

## n = 1

N_1 = array(0,dim = c(4, 4))

dQn = array(NA,dim=c(4, 4, run_t - 1))

```

```

for (i in 1:4){
  for (j in 1:4){
    dQn[i,j,] = diff(Q_t[i,j,]*G_s[i,j,run_s])
  }
}

dQn = array(c(dQn,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0),dim = c(4,4,run_t))

for (i in 1:4){
  for (j in 1:4){
    N_1[i,j] = Q_t[i,j,run_t]*G_s[i,j,run_s]-sum(rev(H[1,j,])*dQn[i,j,])
  }
}

N = N + N_1

F_2_1 = array(NA,dim = c(4,1))
dF_2 = array(NA,dim = c(4,1,run_t))

for (i in 1:4){
  F_2_1[i,1] = t_G[i,][run_t]*P_estado_0[i,1]
  dF_2[i,1,] = diff(t_dG[i,]*P_estado_0[i,1])
}

F_2 = F_2 + F_2_1

## n = n

Qnn_t = Q_t
Qnn_s = Q_s
Pnn = P_estado_J

n_sim = 200 # N° simulaciones máxima, se para al alcanzar la exactitud deseada

for(times in 1:n_sim){
  Qn_t = array(0, dim = c(4,4,run_t))

```

```

Qn_s = array(0, dim = c(4,4,run_s))
Pn = array(NA, dim = c(4,4))
Nn = array(0, dim = c(4,4))
F_2_n = array(0, dim = c(4,1))

# Añadimos el caso de que el proceso entre el estado 0

for (i in 1:4){
  F_2_n[i,1] = sum(
    rev(Qnn_t[i,1,1:run_t]*(Qnn_s[i,1,run_s]/Pnn[i,1]))*
    dF_2[1,1,1:run_t]+
    rev(Qnn_t[i,2,1:run_t]*(Qnn_s[1,2,run_s]/Pnn[i,2]))*
    dF_2[2,1,1:run_t]+
    rev(Qnn_t[i,3,1:run_t]*(Qnn_s[i,3,run_s]/Pnn[i,3]))*
    dF_2[3,1,1:run_t]+
    rev(Qnn_t[i,4,1:run_t]*(Qnn_s[i,4,run_s]/Pnn[i,4]))*
    dF_2[4,1,1:run_t])
}

for(k in 1:run_t){
  for(i in 1:4){
    for(j in 1:4){
      Qn_t[i,j,k] =sum
        (rev(Qnn_t[1,j,1:k])*dQ_t[i,1,1:k]+
         rev(Qnn_t[2,j,1:k])*dQ_t[i,2,1:k]+
         rev(Qnn_t[3,j,1:k])*dQ_t[i,3,1:k]+
         rev(Qnn_t[4,j,1:k])*dQ_t[i,4,1:k])
    }
  }
}

for(k in 1:run_s){
  for(i in 1:4){
    for(j in 1:4){
      # rev: función para invertir la matriz y poder multiplicarla
      Qn_s[i,j,k]= sum

```



```

        (rev(Qnn_s[1,j,1:k])*dQ_s[i,1,1:k]+
         rev(Qnn_s[2,j,1:k])*dQ_s[i,2,1:k]+
         rev(Qnn_s[3,j,1:k])*dQ_s[i,3,1:k]+
         rev(Qnn_s[4,j,1:k])*dQ_s[i,4,1:k])
    }
}

for(i in 1:4){
  for(j in 1:4){
    Pn[i,j] = Pnn[i,1]*P_estado_J[1,j]+
              Pnn[i,2]*P_estado_J[2,j]+
              Pnn[i,3]*P_estado_J[3,j]+
              Pnn[i,4]*P_estado_J[4,j]
  }
}

Gn_s = Qn_s[, ,run_s]/Pn

dQn = array(NA, dim = c(4,4,run_t-1))

for (i in 1:4){
  for (j in 1:4){
    dQn[i,j,] = diff(Qn_t[i,j,]*Gn_s[i,j])
  }
}

dQn = array(c(dQn,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0), dim = c(4,4,run_t))

for (i in 1:4){
  for (j in 1:4){
    Nn[i,j]=Qn_t[i,j,run_t]*Gn_s[i,j]-sum(rev(H[1,j,])*dQn[i,j,])
  }
}

```

```

F_2 = F_2 + F_2_n
N = N + Nn
print(c(n_repeticiones,(times+1)))

Qnn_t = Qn_t
Qnn_s = Qn_s
Pnn = Pn

if(mean(Nn)<0.000000001&&times>60){break} # Exactitud que se busca
}

# Paso final

sum_F_1 = matrix(0,ncol = 4)
sum_F_2 = matrix(0,ncol = 4)

for (i in 1:4){
  sum_F_1[i] = sum(N[i,1:4])*d_estacionaria[i]
  sum_F_2[i] = F_2[i,1]*d_estacionaria[i]
}

total_F_1 = sum(sum_F_1)
total_F_2 = sum(sum_F_2)

F1 = c(F1,total_F_1)
F2 = c(F2,total_F_2)
print(c(n_repeticiones,total_F_1,total_F_2))
}

#### 2. PARAMETROS CIR ####

data = as.matrix(data_2)

# Función de verosimilitud logarítmica

```

```

LogLikCIR = function(param, data, times, test = F, addsign = T){

  theta = param[1]
  k = param[2]
  sigma = param[3]
  N = length(data)

  if(test == T)
    dt = times

  else
    dt = diff(times,1)
  rate = data[1:(N-1)]
  lag_rate = data[2:N]
  ncp = rate * ((4 * k * exp(-k * dt))/(sigma^2 * (1 - exp(-k * dt))))
  d = 4 * theta * k/sigma^2
  c = 4 * k/(sigma^2 * (1-exp(-k * dt)))
  res = sum(dchisq(c * lag_rate, df = d, ncp = ncp, log = TRUE) + log(c))

  if(addsign)
    return(-res)
  else
    return(res)
}

# Función de máxima verosimilitud
MLE = optim(par = list(0.1,0.1,0.1),
           fn = LogLikCIR,
           method = "L-BFGS-B",
           lower = c(0.01,0.01,0.01),
           upper = c(1,1,1),
           data = data,
           times = 1/12,
           test = T)

(CIR_param = MLE$par)

```

```
c(0.04918641, 0.03818706, 0.02483166)
```

```
## [1] 0.04918641 0.03818706 0.02483166
```

```
#### 3. FUNCIÓN CIR ####
```

```
lambda_r = -0.01
```

```
k = CIR_param[2]-lambda_r
```

```
theta = CIR_param[2]*CIR_param[1]/k
```

```
sigma = CIR_param[3]^2
```

```
CirPriceYield = function(r,tau,Param,priceyn = F){
```

```
  h = sqrt(k^2 + 2 * sigma)
```

```
  B = 2 * (exp(h * tau) - 1)/( 2 * h+(k+h) * (exp(tau * h) - 1))
```

```
  A = ((2 * h * exp((k+h) * (tau)/2))/(2 * h+(k+h)*(exp(tau * h)-1)))^(2 * k * theta/sigma)
```

```
  if(priceyn){
```

```
    if(tau == 0)return(1)
```

```
    else return(A * exp(-B * r))
```

```
  }
```

```
  else return((r * B - log(A))/tau)
```

```
}
```

```
priceCIR = c()
```

```
for(j in 1:length(tau))
```

```
{
```

```
  r = theta
```

```
  priceCIR = c(priceCIR, CirPriceYield (r, tau[j], c(theta, k, sigma), T))
```

```
}
```

```
#### 4. UNIMOS TODO ####
```

```
rp_1 = 0.75
```

```
rp_2 = 0.5
```

```
sol = priceCIR*(rp_1+rp_1*(F1*1000)-rp_2*(F2*1000))
```

```

todo = matrix(c(sol,combo$t,combo$D), ncol = 3, nrow = length(sol))

end.time <- Sys.time()
time.taken <- end.time - start.time
time.taken

```

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla

```

df = data.frame(value = sol, t = combo$t, D = combo$D)
(df.long= dcast(df,D~t))

```

##	D	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2
## 1	100	779.8138	657.5082	545.6143	457.7752	395.0955	353.4636	327.3708
## 2	200	898.5644	826.1330	739.8094	652.5188	571.4194	500.7273	442.3665
## 3	300	941.5847	896.8183	836.5975	769.7502	700.7189	632.8562	568.9241
## 4	400	961.9568	931.7383	887.5731	836.7195	781.9150	725.0062	667.7232
## 5	500	973.2852	951.3613	916.9190	876.7084	832.7534	786.0704	737.5619
## 6	600	980.2841	963.4727	935.1680	901.9742	865.6487	826.8312	785.9715
## 7	700	984.9395	971.4859	947.2428	918.7875	887.7887	854.7303	819.8428
## 8	800	988.2092	977.0758	955.6381	930.4832	903.2593	874.3922	844.0143
## 9	900	990.6032	981.1398	961.7125	938.9275	914.4365	888.6495	861.6590
## 10	1000	992.4146	984.1937	966.2530	945.2173	922.7499	899.2614	874.8319
## 11	1100	993.8221	986.5513	969.7393	950.0271	929.0904	907.3468	884.8758
## 12	1200	994.9398	988.4125	972.4772	953.7880	934.0322	913.6358	892.6825
## 13	1300	995.8439	989.9096	974.6686	956.7854	937.9569	918.6174	898.8563
## 14	1400	996.5866	991.1335	976.4517	959.2140	941.1254	922.6274	903.8154
## 15	1500	997.2051	992.1478	977.9231	961.2101	943.7204	925.9016	907.8546

Gráfica

```

library(lattice)
wireframe(sol ~ combo$t * combo$D,
          scales = list(arrows = F),
          xlab = "Tiempo (años)",
          ylab = "Umbral (M euros)",

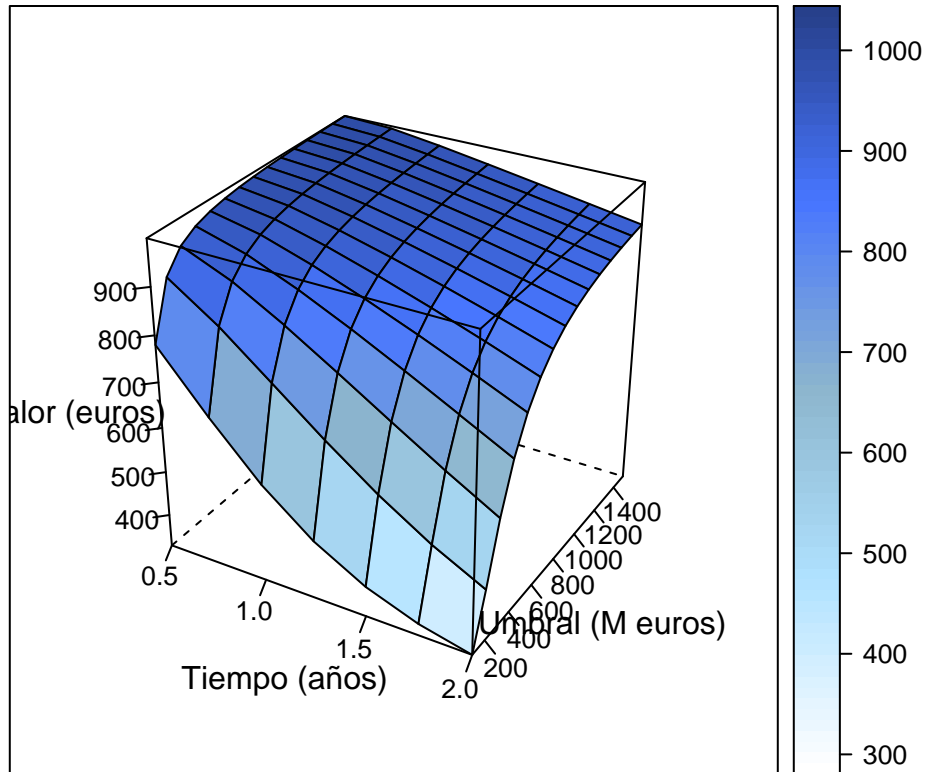
```

```

zlab = "Valor (euros)",
drape = TRUE,
col.regions = colorRampPalette(c("white", "lightskyblue1",
                                "lightskyblue3", "royalblue1",
                                "royalblue4"))(100),

screen = list (z = -30, x = -60)

```

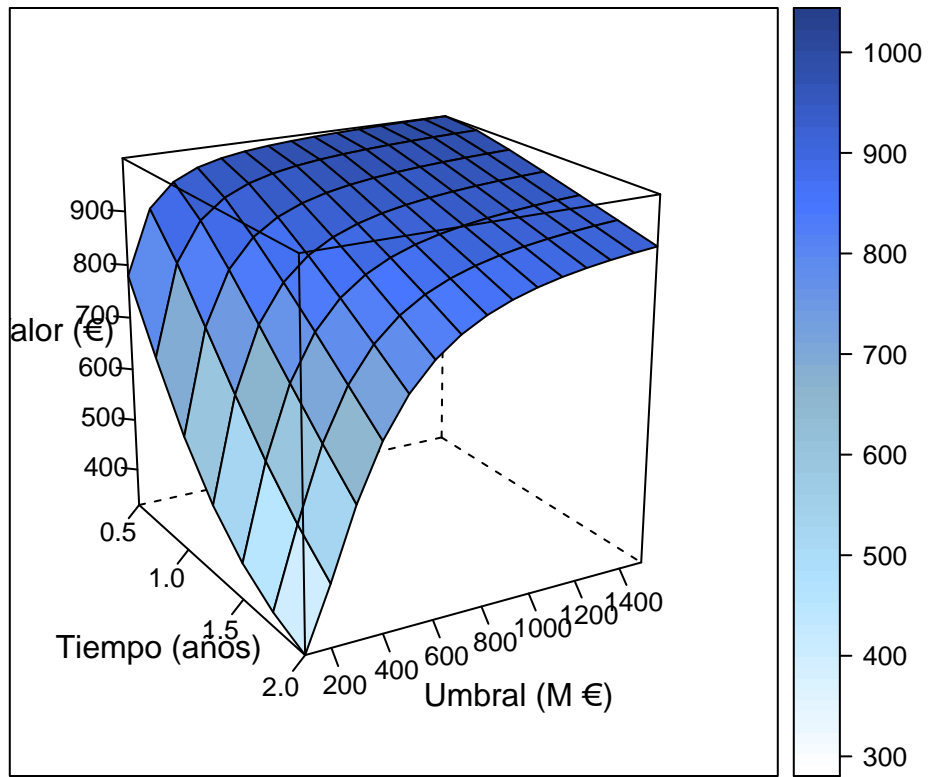


```

wireframe(sol ~ combo$t * combo$D,
          scales = list(arrows = F),
          xlab = "Tiempo (años)",
          ylab = "Umbral (M €)",
          zlab = "Valor (€)",
          drape = TRUE,
          col.regions = colorRampPalette(c("white", "lightskyblue1",
                                          "lightskyblue3", "royalblue1",
                                          "royalblue4"))(100),

          screen = list (z = -60, x = -70))

```



FE DE ERRATAS

1. En la página 53, línea 6, donde dice “prima retroactiva”, debe decirse “prima retrospectiva”.
2. En la página 71, línea 18, donde dice “fuerza de reinversión media”, debe decirse “fuerza de reversión a la media”.