

# ***EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS DE ACCIDENTES DE AVIONES EN CUALQUIER SITIO CERCAÑO A UN AEROPUERTO***

***Barbarán, Gustavo y Jensen Mariani, Santiago Nicolás***

*Subgerencia de Planificación Estratégica*

*Gerencia de Planificación Coordinación y Control*

*Centro Atómico Constituyentes – Comisión Nacional de Energía Atómica*

*Av. Gral. Paz 1499. (1650) San Martín – Provincia de Buenos Aires - Argentina*

*[barbaran@cnea.gov.ar](mailto:barbaran@cnea.gov.ar); [sjensen@cnea.gov.ar](mailto:sjensen@cnea.gov.ar)*

## ***Resumen***

El presente trabajo analiza cuales son las áreas más propicias para construir nuevas instalaciones, evaluando los condicionamientos que impone cualquier sitio cercano a un aeropuerto. Inicialmente se describen las características más relevantes del aeropuerto. Luego se analizan las restricciones impuestas para garantizar la operación normal de los aviones. Seguidamente se presenta un resumen de la evolución de los estudios de accidentes de aviones en instalaciones nucleares. En una segunda parte del trabajo se presentan tres modelos de probabilidades de caída de aviones para el análisis, elaborados en los EE.UU., cada uno con un nivel de complejidad creciente en la modelización de las probabilidades de accidentes. El primer modelo es el “STD-3014” del Departamento de Energía (DOE), el segundo es el “ACRAM” (Metodología de Evaluación de Riesgo de Accidentes Aéreos) elaborado por el “Lawrence Livermore National Laboratory” (LLNL) y por último, el más avanzado es el “ACRP-3” elaborado por la “Transportation Research Board”. Los resultados obtenidos con los tres modelos permiten establecer que los riesgos que el aeropuerto impone sobre los alrededores, se mantienen acotados debido a la mejora e innovación en la seguridad de las aeronaves, reduciendo el margen de riesgo para la localización de nuevas instalaciones nucleares cercanas a un aeropuerto.

## ***Abstract***

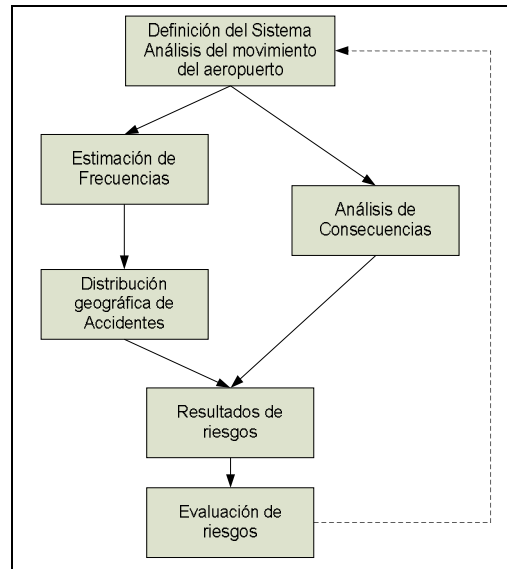
This work analyzes the more suitable areas to build new facilities, taking into account the conditions imposed by an airport located nearby. Initially, it describes the major characteristics of the airport. Then, the restrictions imposed to ensure the normal operation of the aircrafts are analyzed. Following, there is a summary of the evolution of studies of aircraft accidents at nuclear facilities. In the second part, three models of aircraft crash probabilities are presented, all of them developed in the U.S.A, each with an increasing level of complexity in modeling the likelihood of accidents. The first model is the “STD-3014” Department of Energy (DOE), the second is the “ACRAM” (Aircraft Crash Risk Assessment Methodology) prepared by the “Lawrence Livermore National Laboratory” (LLNL) and finally the more advanced “ACRP-3”, produced by the “Transportation Research Board”. The results obtained with the three models establish that the risks imposed on the airport vicinity, remain low due to the improvement and innovation in the safety of aircrafts, reducing the risk margin for the location of new nuclear facilities near an airport.

## 1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Piers<sup>[1]</sup> la metodología general utilizada para establecer el riesgo que impone un aeropuerto sobre sus alrededores se compone de tres elementos principales (Figura 1). Una estimación de frecuencias de caída de aviones, una distribución geográfica de dichas caídas y un análisis de las consecuencias de dicha caída. El presente trabajo desarrolla los dos primeros elementos, sin realizar consideraciones sobre las consecuencias.

En primer lugar, la probabilidad de un accidente aéreo en las cercanías de un aeropuerto depende de la probabilidad de accidente por movimiento de aeronaves (aterrizajes o despegues) y el número de movimientos realizados por año. Estas probabilidades, llamadas tasas de accidentes, deben determinarse a partir de datos históricos.

El segundo elemento principal es la determinación de la distribución geográfica de probabilidades de un accidente, dado que no es igual en todos los lugares cercanos a un aeropuerto. En una primera aproximación, uno podría pensar que la distribución geográfica de accidentes está relacionada con las direcciones de las pistas y las rutas de vuelo, junto con la ubicación geográfica del aeropuerto. En qué medida y que tipo de modelos se usarán para la representación geográfica de accidentes también es relevante.



**Figura 1: Metodología de evaluación de riesgos de un aeropuerto.**

Estos dos elementos permiten tener un análisis completo de las probabilidades de accidentes de aviones en los alrededores de un aeropuerto. La determinación de las consecuencias de un impacto se estudia cuando la probabilidad de caída de una aeronave en un lugar determinado se considera inaceptable y se busca determinar el riesgo consecuente. (Por aquello que riesgo es igual a probabilidad por consecuencia).

## 2. CARACTERIZACIÓN DE UN AEROPUERTO

Al describir un aeropuerto se puede hacer una primera diferenciación, en función de si es un aeropuerto internacional o regional. La diferencia primordial entre uno y otro está determinada por la envergadura del avión representativo que puede operar en dicho aeropuerto siendo los de mayor envergadura aviones correspondientes a vuelos internacionales.

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) caracteriza a los aeropuertos a través una categoría alfanumérica, compuesto por un número y una letra, las características de la aeronave que puede operar en un aeropuerto.

El número hace referencia a la longitud de Campo de Referencia del avión (ver Tabla

1), siendo esta la longitud mínima requerida para el decolaje, con el peso máximo homologado de despegue a nivel del mar, en una pista sin inclinación, con una velocidad de viento cero y en una atmósfera tipo.

Número	Campo de Referencia
1	Hasta 800 m
2	De 800 m a 1200 m
3	De 1200 m a 1800 m
4	Más de 1800 m

**Tabla 1: Categorías de aviones**

La letra indica la envergadura de la aeronave y la distancia externa del tren de aterrizaje principal de la aeronave. Un ejemplo de esto puede verse en la Tabla 2.

Categoría	Rango de envergadura	Ejemplos
A	hasta 15 m	Aviación General Lear Jet 55
B	de 15 hasta 24 m	Fokker F-28 2000
C	de 24 hasta 36 m	Airbus A320-200; Boeing 737-200/300/400
D	de 36 hasta 52 m	Boeing 707-300; Airbus A300
E	de 52 hasta 65 m	Boeing 747-300/400; Airbus A340
F	de 65 hasta 80 m	Airbus A380

**Tabla 2: Categorías de aviones**

A su vez dependiendo del uso y las características de la aeronave se puede hacer la siguiente división,

- Aviación Comercial
  - Grandes Aviones
  - Pequeños Aviones (hasta 30 pasajeros o hasta 3500 kg de carga)
- Aviación Militar
  - Aviones Militares Grandes
  - Aviones Militares Pequeños
- Aviación General
  - De un solo motor
  - De múltiples motores
  - Turbopropulsado
  - Turbojets
- Helicópteros

Cada una de ellas tienen características particulares de operación en el aeropuerto y cercano a éste, que difiere en función de prioridad (ya sea un vuelo sanitario, militar "presidencial", en emergencia, etc.), o de las características intrínsecas de la aeronave (vuelo estacionario, velocidad, techo de operación, etc.)

## **Espacio aéreo controlado**

Un espacio aéreo es una porción de la atmósfera terrestre, tanto sobre tierra como sobre agua, regulada por un país en particular. Un espacio aéreo está controlado cuando existe un servicio de control de tránsito aéreo, en donde todos los pilotos están sujetos a ciertos requisitos, reglas de operación, y requerimientos para sus aeronaves de conformidad con la clasificación de dicho espacio. El control de tránsito generalmente lo ejerce la torre de un aeropuerto, que puede permitir vuelos mediante reglas visuales “VFR” (Visual Flight Rules), por instrumentos “IFR” (Instrument Flight Rules), o ambas.

Los servicios referidos a la navegación en un aeropuerto son:

- Servicio de información de vuelo: Servicio cuya finalidad es aconsejar y facilitar información útil para la realización segura y eficaz de los vuelos.
- Servicio de alerta: Servicio suministrado para notificar a los organismos pertinentes respecto a aeronaves que necesitan ayuda de búsqueda y salvamento, y auxiliar a dichos organismos según convenga.

El Centro de Control de Área (ACC), también conocido como un centro de control, es una instalación encargada de controlar las reglas de vuelo por instrumentos las aeronaves en ruta en un determinado volumen de espacio aéreo (una región de información de vuelo) en las altas altitudes entre los enfoques de los aeropuertos y salidas, a través de un radar.

## **Características de operación en función del entorno**

La ubicación del aeropuerto y la geografía natural o artificial circundante es un factor clave en la caracterización de un aeropuerto. La existencia de elevaciones tales como cerros, montañas o edificios en las cercanías, pueden dificultar el tránsito de las aeronaves tanto en el despegue como en el aterrizaje, debido a turbulencias generadas por el viento al pasar por estas elevaciones y la modificación del trayecto del circuito de aterrizaje o despegue del avión.

La altura de la pista con respecto al nivel del mar es otro factor importante porque a mayor altura la densidad del aire es menor al ser menor la presión atmosférica. La fuerza de sustentación de un avión depende de la densidad del aire y en el caso que esta disminuya, el avión debe volar a mayor velocidad para lograr la misma sustentación, por lo tanto la velocidad de despegue y aterrizaje de un avión en aeropuertos de altura debe ser mayor, como es el caso del aeropuerto Internacional El Alto en Bolivia que se encuentra emplazado a 4061 msnm.

Las condiciones climáticas extremas o intermitentes sobre el aeropuerto es otro importante factor a evaluar, estas pueden ser niebla que disminuye la visibilidad, temperaturas bajo cero que produzcan hielo en la pista o sobre las alas del avión disminuyendo el rendimiento del mismo, vientos intermitentes cruzados con respecto a la pista que pueden despistar un avión, temperaturas extremas que afecten las cubiertas de los aviones o tormentas de nieve por citar algunas.

## Volumen de actividad del aeropuerto.

El volumen de actividad de un aeropuerto está determinado principalmente por su ubicación geográfica en conjunto con la categoría del aeropuerto. Mientras mayor sea el número de habitantes en el país mayor es la probabilidad de que sus aeropuertos tengan un elevado tránsito de pasajeros (arribos y partidas), más aún si el aeropuerto está ubicado en un punto geográfico estratégico que sirva como escala para otros vuelos internacionales. En el caso de Argentina esto último no es así dado que al ser el país más austral, este se convierte en un destino final y no de tránsito. Esto puede apreciarse en la Figura 2.



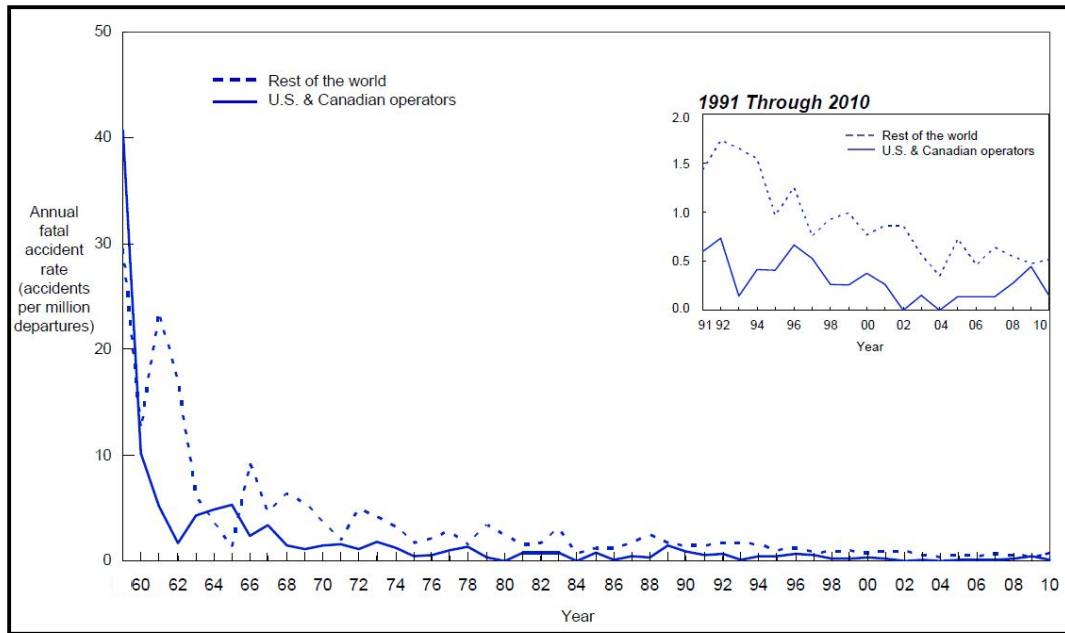
Figura 2: Rutas aéreas en el continente americano.

## ESTIMACION DE FRECUENCIAS DE ACCIDENTES

Un accidente aéreo se puede definir como un evento asociado con la operación de una aeronave que tiene lugar entre el instante en el que una persona aborda un avión con la intención de realizar el vuelo en el mismo, y aquel instante en el que todas las personas han desembarcado del avión luego de finalizado el vuelo.

Esta definición incluye muertes y lesiones severas ocasionadas por: estar en el avión al momento del accidente, estar en contacto con la aeronave, o exposición directa con los gases de la combustión de los motores. Sin embargo, se excluyen muertes y lesiones por causas naturales, causadas por otras personas, por objetos que no se encuentran visibles a los pasajeros y tripulación, y aquellas lesiones causadas por turbulencia atmosférica, objetos sueltos, embarque, desembarque, evacuación, y mantenimiento y servicio, y lesiones no mortales a personas en tierra que no se encuentran a bordo del avión al momento del accidente.

No se consideran accidentes aquellos causados por sabotaje, terrorismo, o cualquier otra acción hostil, ni la acción militar o el resultado de vuelos experimentales. En las estadísticas mundiales que elabora Boeing<sup>[iii]</sup>, se excluyen las aeronaves fabricadas dentro del territorio de la ex USSR, y aviones comerciales que se usan en el servicio militar. En la Figura 3 se muestra una evolución de la tasa de accidentes por año, discriminada por operadores de EEUU y Canadá por un lado, y el resto del mundo por otro. En el recuadro de la figura se observa la evolución de la tasa en los últimos 20 años, observándose una convergencia a tasas menores a  $10^{-6}$  [accidentes/año].



**Figura 3: Tasa anual de accidentes fatales, por millón de partidas. 1959-2010<sup>[ii]</sup>**

A nivel regional también se observan disparidades en cuanto a la tasa de accidente. En la tabla 3 se agrupan de acuerdo al promedio de los accidentes en un rango temporal. Se observa cómo descienden dichas tasas para ir convergiendo a valores menores a un accidente por millón de vuelos.

Región	Tasa de accidentes por millón de vuelos		
	1980-1996 <sup>[iii]</sup>	1994-2003 <sup>[iv]</sup>	1997-2006 <sup>[v]</sup>
<b>EEUU y Canadá</b>	1.0	0.4	0.17
<b>Europa</b>	1.5	0.6	0.34
<b>América Latina y Caribe</b>	4.5	2.4	1.41
<b>África</b>	8.0	13.3	5.93

**Tabla 3: Tasa de accidentes fatales por regiones seleccionadas.**

Los accidentes se pueden clasificar según la etapa de vuelo en la que se encuentra la aeronave. En la Figura 4, se muestra la estadística de distribución de los accidentes entre 2001 y 2010, la cantidad de accidentes fatales y la cantidad de muertes abordo, de acuerdo a las estadísticas de Boeing. Los resultados son calculados en base a un vuelo de 1,5 horas de duración. Más del 50% de los accidentes ocurren durante las etapas de despegue y ascenso inicial (21%) y en la aproximación final y aterrizaje (34%), que son las etapas que interesan a este estudio.

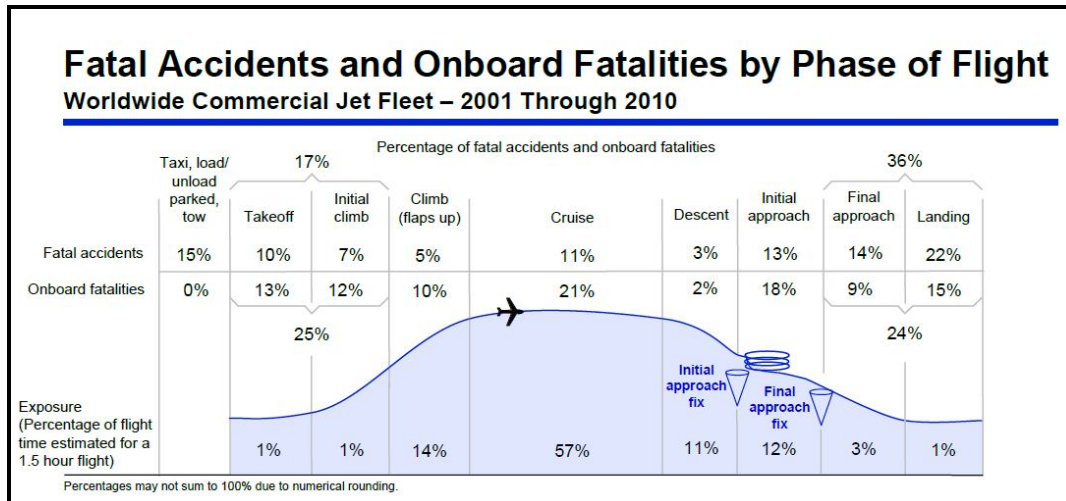


Figura 4: Porcentaje de accidentes según etapa de vuelo. 2001-2010<sup>[iii]</sup>

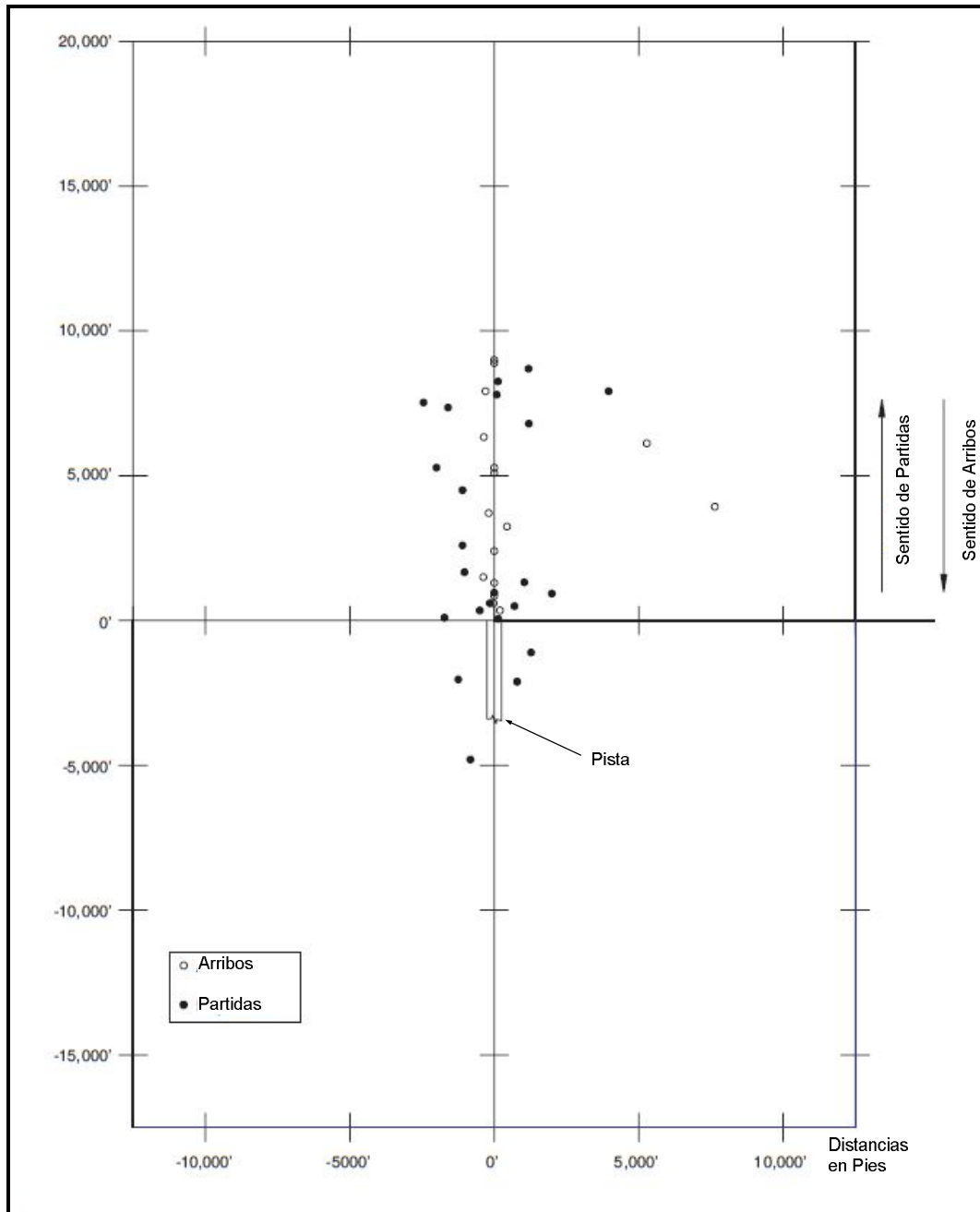
### Modelo de probabilidad de caída de aviones.

La determinación de la probabilidad de caída de aviones es algo relativamente sencillo, claramente depende de las características del aeropuerto y de los aviones que operen allí, aunque se deben tener en cuenta algunas consideraciones. Debido a que la aviación es un modo de transporte seguro, el número de accidentes en un aeropuerto específico es muy pequeño como para tomarlo como referencia para estimar una tasa de accidentes. Para lograr una base estadística adecuada, los datos de aeropuertos que posean el mismo entorno, y que operen bajo las mismas condiciones pueden ser usados para lograr una base estadística adecuada.

Dado que existen grandes diferencias entre las tasas de accidentes para diferentes regiones del mundo, las diferentes categorías de aviones, los diferentes tipos de operación, etc., la tasa de accidentes calculada a partir de un conjunto de datos de gran tamaño no puede simplemente aplicarse a un aeropuerto en particular. Debe ser calculada a partir de una selección de los datos que se considere representativo para el aeropuerto bajo investigación con el fin de llegar a resultados específicos del aeropuerto del cálculo del riesgo.

## DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE ACCIDENTES

Los datos históricos muestran que los puntos de contacto con la superficie, de los aviones accidentados durante la etapa de despegue o aterrizaje, se encuentran concentrados longitudinalmente con respecto a la dirección del avión y cercanos transversalmente a la misma, esto puede observarse en la Figura 5. Allí se observa que la distribución de los accidentes cercanos a los puntos de despegue y aterrizaje no es aleatoria, aunque pueda deberse a distintas causas.



**Figura 5: Distribución de los accidentes en el despegue y aterrizaje con respecto a la pista.<sup>[vi]</sup>**

En el aterrizaje, la causa de accidentes más común es la falla del piloto de no poder mantener la velocidad necesaria para que el avión tenga sustentación, error que a mayor altura es de fácil corrección pero que a baja altura el piloto no tiene tiempo para corregir, dando por resultado un accidente.

En cambio durante el carreteo y posterior ascenso para despegar, los motores están sometidos a requerimientos de potencia mucho mayores a los necesarios durante las restantes etapas del vuelo, y es un momento crítico porque es en ese instante que es mayor la probabilidad de que se presente una falla en el motor. Bajo esa situación de emergencia al acercarse a la cabecera opuesta de la pista el piloto debe evaluar si esta en



condición de frenar la aeronave para no despistarse, o intentar despegar igual con el riesgo de no alcanzar la velocidad necesaria para la sustentación, ocurriendo lo mismo que en el caso anterior.

En Argentina el registro de accidentes lo realiza la Junta de Investigaciones de Accidentes de Aviación Civil (JIAAC)<sup>1</sup>, que tiene la misión de determinar las causas de los accidentes e incidentes acaecidos en el ámbito de la aviación civil cuya investigación técnica corresponda instituir y recomendar acciones eficaces dirigidas a evitar su ocurrencia en el futuro, a fin de promover la seguridad en el citado ámbito.

### **Modelo de distribución geográfica de accidentes.**

Dada la ocurrencia de un accidente, el modelo de distribución geográfica describe la probabilidad de que la aeronave accidentada termine en un lugar determinado. Como se mencionó previamente, a priori uno tiende a pensar que esa distribución depende de la orientación de las pistas del aeropuerto y de las rutas que sigue el mismo. A nivel mundial, las estadísticas de accidentes no presentan datos precisos de la ubicación de los accidentes (más del 80% de los informes sobre accidentes no incluyen una descripción adecuada del lugar del accidente)<sup>[i]</sup>. Este modelo determina la distribución del riesgo en los alrededores del aeropuerto y por lo tanto, la forma de los contornos de riesgo individual.

A través del tiempo se desarrollaron diferentes enfoques para la modelación de la ubicación de los accidentes. Los modelos desarrollados inicialmente no dependían de la ubicación, dado que su desarrollo estaba en la división de segmentos angulares en torno a la pista, la probabilidad en cada sector estaba dada por la cantidad de impactos que habían ocurrido allí, dividido la cantidad de impactos totales. Este modelo se desarrolló de esta forma debido a que los reportes de accidentes daban como dato de ubicación la referencia angular respecto a la pista. Actualmente estos modelos están en desuso.

Modelos más recientes toman como referencia a la pista sobre la cual opera la aeronave<sup>[vii]</sup> que tuvo el accidente o la ruta planeada<sup>[viii]</sup> por la aeronave que tuvo el siniestro. El primero de los dos modelos es más usado en las cercanías a un aeropuerto debido a que no siempre, en los reportes de accidentes, se menciona la ruta seguida por el avión. Sin importar el modelo utilizado, si debe tenerse en cuenta que para que sea relevante, debe tener una fuerte base de datos asociada para su validación, es por ello que prácticamente no se utilizan modelos realizados ad-hoc para un aeropuerto en forma exclusiva, sino que se manejan con bases de datos a nivel mundial.

Cuando se inicia la actividad aerocomercial, se ubicaron a los aeropuertos lejos de las ciudades. Con el crecimiento demográfico, éstas fueron cercando a los aeropuertos hasta llegar a situaciones como las actuales en la Ciudad de México, por ejemplo. Esto, junto con el incremento de los movimientos aéreos, llevo a concientizar cada vez más a las autoridades sobre los riesgos que impone un aeropuerto en su entorno cercano. En la actualidad existen muchos programas<sup>[iv][ix][x]</sup> que realizan análisis de riesgos en las cercanías de los aeropuertos, estableciendo una planificación territorial en sus alrededores.

---

<sup>1</sup> <http://www.jiaac.gov.ar/>

## MODELOS DE PROBABILIDAD DE ACCIDENTES DE AVIONES

Aquí se detallan tres modelos de probabilidad de caída de aviones en lugares cercanos a aeropuertos. El primer modelo es el “STD-3014” del Departamento de Energía (DOE), el segundo es el “ACRAM” (Metodología de Evaluación de Riesgo de Accidentes Aéreos) elaborado por el “Lawrence Livermore National Laboratory” (LLNL) y por último, el más avanzado es el “ACRP-3” elaborado por la “Transportation Research Board”. Los dos primeros<sup>[xi][xii]</sup> están relacionados con la industria nuclear, fueron realizados hace más de 15 años y revalidados recientemente. Esto no es de extrañar, dada la noción de cultura de la seguridad de la industria nuclear. Previo al movimiento actual de estudio de los riesgos que supone el transporte aéreo, la industria nuclear ya estudiaba las características de los accidentes aéreos y sus probabilidades<sup>[xiii][xiv]</sup>. Un tercer estudio<sup>[iv]</sup> está dirigido al riesgo que impone un aeropuerto en sus alrededores, dirigido a crear áreas de seguridad de las pistas (runway safety áreas – RSA) para planificación territorial en los alrededores de los aeropuertos.

### Modelo General de Estimación de Probabilidad de Accidentes Aéreos

La estimación de caída de aviones e impacto sobre un lugar determinado tiene su fundamento teórico en la regla de Bayes de probabilidades condicionales<sup>[xv]</sup>. Dicho modelo plantea sucesivos eventos donde cada uno implica la ocurrencia del anterior.

Expresado en palabras el accidente de caída de aviones es el evento en que una aeronave que pasa por la zona de estudio tiene un accidente y cae a tierra, una vez que impacta en el suelo debe caer sobre la instalación. Dicha caída debe causar un daño a la instalación.

Simbólicamente,

$$D \subseteq T \subseteq I$$

Dónde:

- $D = \{ \text{La instalación es dañada por el impacto} \}$
- $T = \{ \text{La aeronave impacta en la instalación} \}$
- $I = \{ \text{La aeronave que pasa por la zona tiene un accidente y cae a tierra} \}$

Suponiendo todos los eventos como independientes y desarrollando la regla de Bayes, la probabilidad de un daño en una instalación debido a un accidente aéreo es:

$$P(D) = P(D|T) \times P(T|I) \times P(I) \quad (1)$$

Cada uno de los modelos presentados desarrolla la fórmula de diferentes maneras, aunque todas se basen en el mismo modelo probabilístico. Analizando cuidadosamente, la probabilidad de que una aeronave impacte en la instalación  $P(T|I)$ , puede ser considerada un evento independiente a la probabilidad de que la aeronave tenga un accidente, por lo que la fórmula puede ser reescrita como:

$$P(D) = P(D|T) \times P(T) \times P(I) \quad (2)$$

Cada uno de los modelos presentados en este trabajo, se desarrollan basándose en la misma fórmula de probabilidades condicionales y suponiendo la independencia de eventos.

#### **STD-3014 - Accident analysis for aircraft crash into hazardous facilities.**

Este estándar del departamento de energía de los EEUU tiene como objetivo proveer un enfoque robusto, consistente y técnicamente razonable para analizar los riesgos que una aeronave puede provocar sobre una instalación. El estándar está enfocado en analizar el riesgo que impone al público un accidente de estas características debido a la liberación de material peligroso como consecuencia de un choque. Otra consideración importante en el desarrollo de ese trabajo es el enfoque de análisis de riesgo, en comparación con una estimación de riesgo, ya que tiene por objeto proporcionar la información suficiente para tomar medidas de seguridad en la instalación y así reducir las consecuencias de un accidente.

Para la estimación del valor esperado de caída de aviones, desarrolla la fórmula probabilística previamente considerada en lo que denomina la fórmula de los cuatro factores. Esta fórmula determina el valor esperado de probabilidad de caída de una aeronave sobre una instalación, teniendo en cuenta todos los movimientos aéreos de todos los tipos de aviones.

$$F = \sum_{i,k,j} N_{ijk} * P_{ijk} * f_{ijk}(x,y) * A_{ij} \quad (4)$$

Dónde:

- $F$  = Valor esperado anual de impactos de aviones sobre la instalación de referencia [número de impactos/año].
- $N_{ijk}$  = Número anual estimado de operaciones de aviones específicas en el sitio (despegues, aterrizajes, vuelos).
- $P_{ijk}$  = Tasa de accidentes de aviones por etapa de vuelo, por tipo de avión y por aeropuerto.
- $f_{ijk}(x,y)$  = probabilidad condicional (por milla cuadrada) de caída de aviones dada una evaluación en el sitio de la instalación.
- $A_{ij}$  = Área específica de la instalación de interés.
- $i$  = índice que clasifica las diferentes etapas de vuelo (despegue, aterrizaje y vuelo)
- $j$  = índice de categoría o subcategoría de aeronave (comercial, militar, general, etc.)
- $k$  = índice correspondiente a las fuentes de vuelos (pista de cada aeropuerto)

En lo que respecta a caída de aviones, establece valores de referencia de probabilidad de caída de aeronaves por tipo de avión, los cuales se muestran en la tabla 4. Como estándar conservativo, se observa que si se suman las probabilidades de accidentes de aviones para un avión comercial en sus fases de despegue, aterrizaje y en vuelo (su valor promedio), la tasa resultante de accidentes resulta mayor que la expuesta previamente en las estadísticas mundiales.

Aeronave	Tasa de Accidentes <sup>1</sup>				
	Despegue	Aterrizaje	Vuelo		
			Mínimo	Promedio	Máximo
General	$1,1 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-3}$
Comercial Carrier	$1,9 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-6}$
Comercial Taxi	$1,0 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^{-6}$
Militar grande	$5,7 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$6,0 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$
Militar chico	$1,8 \times 10^{-6}$	$3,3 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^{-6}$	$6,0 \times 10^{-6}$
Helicópteros	- <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>	$2,5 \times 10^{-5}$	- <sup>2</sup>

**Tabla 4: Tasa de accidentes por tipo de avión<sup>[xi]</sup>**

<sup>1</sup>La tasa de accidentes está dada por operación.

<sup>2</sup>La tasa de accidentes de helicópteros está dada en base a los vuelos que realiza el mismo. Se referencia en despegue sólo por conveniencia.

En cuanto a la distribución geográfica de accidentes, nuevamente se toma por tipo de avión la probabilidad, dadas las diferencias ya discutidas sobre los mismos. En este trabajo, se toman a modo de ejemplo, las probabilidades condicionales de aviones comerciales carrier (grandes) que son los que operan con mayor frecuencia en los grandes aeropuertos. Las distribuciones geográficas para otro tipo de aviones aparecen en [ref. xi].

El estándar establece densidades de probabilidad condicional por milla cuadrada, por tipo de avión y por tipo de operación (ya sea aterrizaje o despegue), dado que no poseen una misma distribución en el espacio. El área  $A_{ij}$  hace referencia a un lugar determinado dentro de ese espacio y puede ser interpretada como la probabilidad condicional de que, dado un impacto en la milla cuadrada de referencia, la aeronave efectivamente impacte sobre la instalación. En este ejemplo, se toma como área de referencia una hectárea (100 m x 100 m).

En la figura 6 se muestra la probabilidad condicional sobre el terreno por milla cuadrada para aterrizaje y despegue (suma de probabilidades) de un avión del tipo comercial para un espacio comprendido entre 5 millas antes y después del centro de la pista (tomado como eje de coordenadas) y 4 millas a ambos lados de la misma y un área de impacto de una hectárea.

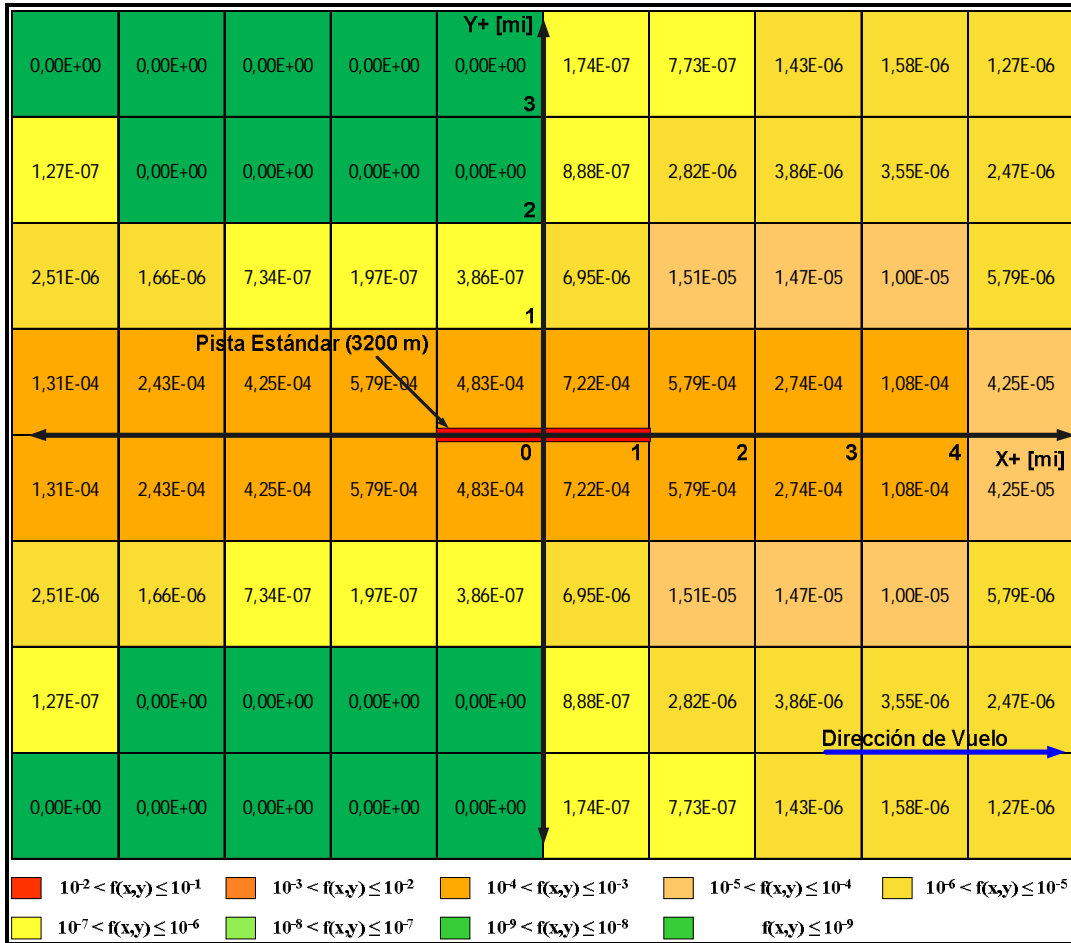


Figura 6: Distribución de geográfica de probabilidades con respecto a la pista, en despegue y aterrizaje por milla cuadrada, para un área de 100m x 100m.

Se puede ver que las probabilidades más elevadas quedan sobre el eje de la pista principal, comprendidas entre los 1600 metros a cada lado del eje de la pista. A medida que uno se aleja en el sentido perpendicular, las probabilidades decaen fuertemente.

### ACRAM - Aircraft Crash Risk Analysis Methodology

La metodología de ACRAM es la similar a la del STD-3014, con la salvedad que en lugar de distribuciones de probabilidad dadas por millas cuadradas, presenta la probabilidad como funciones de distribución de probabilidad, lo que permite una mejor discriminación del espacio alrededor de una pista. También, para la determinación de las probabilidades se tiene en consideración el tipo de vuelo y el tipo de aeronave. La distribución sobre el eje de la pista se ajustó a distribuciones logaritmo-normal, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln(x-\mu)]^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

Dónde:

- $x$  = Distancia sobre el eje de la pista

- $m$  = media de la distribución
- $s$  = desviación estándar de la distribución

Para la distribución sobre el eje perpendicular a la pista, se tomó una distribución del tipo Weibull, simétrica a ambos lados de la pista, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f(y; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{y}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(y/\lambda)^k} & y \geq 0 \\ \frac{1}{2} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{-y}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(-y/\lambda)^k} & y < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Dónde:

- $y$  = Distancia sobre el eje de la pista
- $\lambda$  = parámetro de escala de la distribución
- $k$  = parámetro de forma de la distribución

El parámetro de forma depende de la distancia sobre el eje de la pista ( $x$ ) de la siguiente manera:

$$k(x; a, b) = e^{a+b*x} \quad (7)$$

En la figura 7 se observa un gráfico de la distribución de probabilidades en un espacio geográfico comprendido entre 5 millas antes y después de centro de la pista, tomado como origen de coordenadas. Para ambos lados se toma una distancia de cuatro millas. Para la determinación de las probabilidades dentro de dicho espacio, se integró en cuadrados de 100 m x 100 m las funciones consideradas previamente.

Se observa que siguen los mismos patrones en su distribución y si se integra sobre ambas superficies, el valor resultante de la probabilidad total será prácticamente igual.

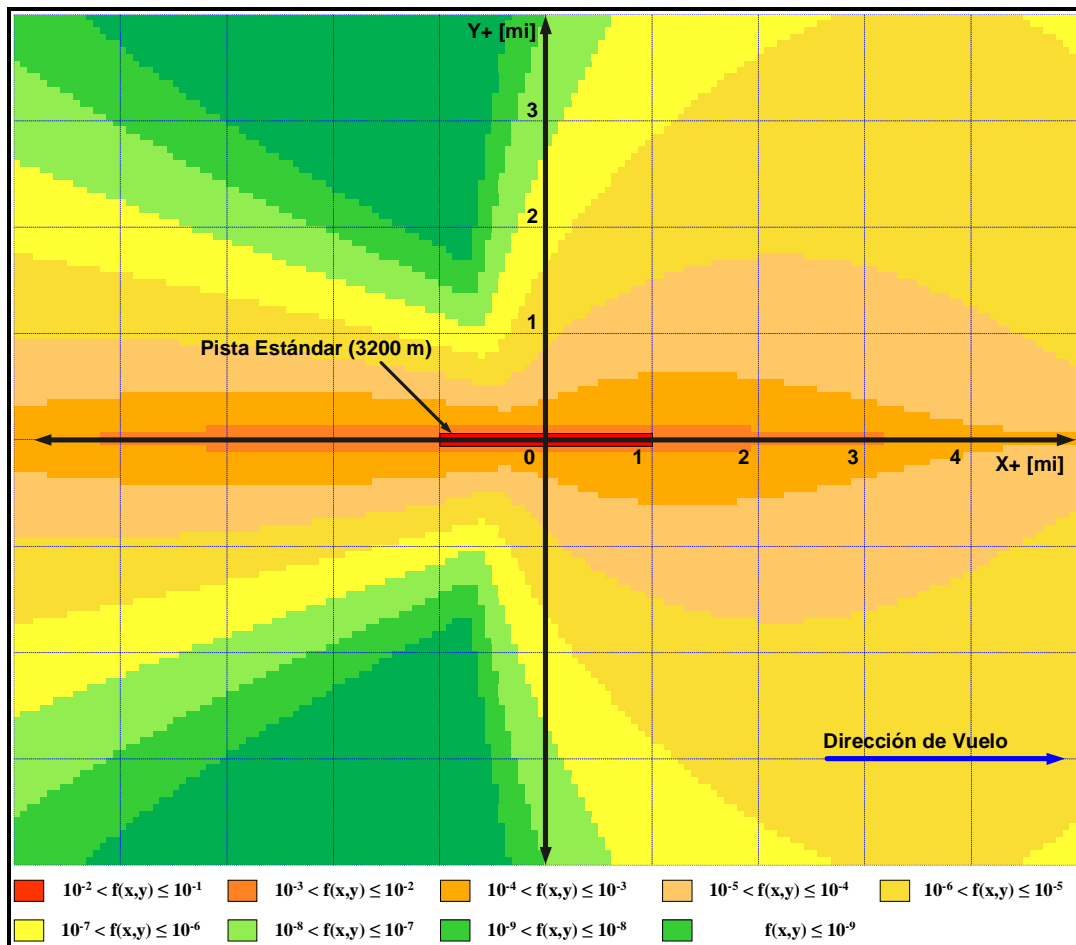


Figura 7: Distribución geográfica de probabilidades en despegue y aterrizaje con respecto a la pista. ACRAM

### ACRP Report 3 – Analysis of Aircraft overruns and undershoots for runway safety areas.

Este modelo fue desarrollado con el objeto de realizar un análisis de evaluación de riesgos en operaciones de despegue y aterrizaje (salidas de pista, aterrizajes cortos y rebase final de la pista, como los más relevantes) para la determinación de áreas de seguridad de la pista (runway safety áreas – RSA). Dichas áreas, deberían ser capaces, bajo condiciones normales, de soportar una aeronave sin causar daños estructurales a la misma ni provocar lesiones en sus ocupantes. La RSA tiene por objetivo incrementar la seguridad en los aeropuertos.

Como el objetivo final es la búsqueda de un incremento en la seguridad de las áreas alrededor de la pista, los modelos se centran en un área dentro de los límites de un aeropuerto. Sin embargo, es de destacar el modelo de estimación de accidentes de aviones en aterrizajes y despegues, donde, para el establecimiento de la probabilidad de un accidente recurre no solamente al tipo de avión, como en los modelos anteriormente vistos, sino que toma en consideración las características operatorias y climáticas. Esta probabilidad se puede expresar como:

$$P\{\text{ocurrencia de Accidentes}\} = \frac{1}{1 + e^{b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots}}$$

Dónde:

- $P\{\text{ocurrencia de accidentes}\}$  es la tasa de probabilidad de accidentes para una determinada condición de vuelo (aterrizaje, etc.)
- $X_i$  son variables independientes como ser visibilidad, tipo de aeronave, precipitaciones, etc.
- $b_i$  son los coeficientes para cada variable (estimados por regresión logística)

Usando este enfoque en vez de solamente tomar la tasa de accidentes, el modelo prevé como resultado un mejor reflejo de las condiciones y circunstancias específicas de un aeropuerto. Las variables independientes usadas en el modelo son:

- Tipo de aeronaves: pequeñas, medianas, grandes.
- Tipo de propulsión: jets, turbopropulsados.
- Destino de las aeronaves: nacional, internacional.
- Tipo de aeropuerto: destino final, de conexiones.
- Uso de las aeronaves: comercial, carga, charters.
- Techo de nubes: menos de 1000 pies, entre 1000 y 2500 pies, más de 2500 pies
- Visibilidad: menos de 2 millas, entre 2 y 4 millas, entre 4 y 6 millas, entre 6 y 8 millas, más de 8 millas
- Niebla
- Vientos cruzados: entre 2 y 5 nudos, entre 5 y 12 nudos, más de 12 nudos.
- Ráfagas
- Presencia de hielo
- Presencia de nieve
- Lluvias
- Temperaturas: menos de 5° C, entre 5° C y 15° C, más de 25° C.
- Tormentas eléctricas
- Terreno relevante: por terreno relevante se entiende a elevaciones de más de 4000 pies sobre la pista en la línea visual del aeropuerto o más de 2000 pies sobre la pista en un radio de 6 millas centrado en el aeropuerto.

Todas las variables están dadas en porcentajes de ocurrencia. Algunas variables contribuyen a aumentar la probabilidad de ocurrencia de accidentes mientras que otras variables a contribuyen a disminuir la misma.

En cuanto a la ubicación de los accidentes, el modelo de distribución de probabilidades toma la forma de una distribución exponencial del tipo:

$$P\{\text{ubicación} > x\} = e^{-ax^n}$$

Dónde:

- $P\{\text{ubicación} > x\}$  es la probabilidad de un accidente sobre el eje de la pista más allá de la distancia  $x$
- $a, n$  son parámetros estimados por correlaciones.

Para estimar la ubicación en el eje perpendicular a la pista, eje  $y$ , el modelo supone una distribución de las mismas características que en  $x$ , con parámetros estimados por



correlaciones del mismo modo que el anterior. Este modelo supone que la distribución de las probabilidades sobre el eje de la pista y perpendicular a esta son independientes. Es decir, no existe una relación entre ellos como en los modelos anteriores.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se analizan las consideraciones necesarias para evaluar los riesgos que los aeropuertos imponen sobre sus alrededores. Presenta tres metodologías para la estimación de las probabilidades de caída de aviones en algún lugar en las cercanías del aeropuerto. Para la estimación del riesgo que impone el aeropuerto, también se deben realizar análisis sobre las consecuencias que provocaría un accidente sobre alguna instalación específica, tema que no se trata en el presente trabajo.

Con la evolución de las metodologías de evaluación de accidentes, se observa que los modelos se van complejizando, incluyendo variables que permiten tener en consideración características propias del aeropuerto y las operaciones que allí se realizan. Al mismo tiempo, siendo la aviación el modo de transporte masivo más seguro del mundo, es razonable pensar que ésta siga incrementando sus márgenes de seguridad.

En todos los modelos, así como en la información histórica de los accidentes en los alrededores de un aeropuerto, la probabilidad de accidentes está concentrada fuertemente sobre el eje de la pista en los aterrizajes y en los despegues, aun cuando existe una mayor dispersión en el despegue que en aterrizaje, esto es inherente a las características de las operaciones de los aviones. Como uno de los objetivos de este trabajo era ver cuáles son las áreas propicias en los alrededores de un aeropuerto, claramente se deduce que una instalación alejada del eje de la pista tendrá menos riesgo que una que se encuentre sobre el mismo.

## REFERENCIAS

---

- [i] Probabilistic safety assessment and management, PSAM 4: proceedings of the 4th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, 13-18 September 1998, New York City, USA, Volumen 3. Capítulo LXIV y subsiguientes. Editores: A. Mosleh, R. A. Bari. Springer Science & Business, 1998.
- [ii] Boeing, Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, Worldwide operations 1959-2010. Seattle, junio de 2010.
- [iii] Civil Aviation Authority. CAP 681 – Global Fatal Accident Review 1980-1996. West Sussex, marzo de 1998.
- [iv] Airport Cooperative Research Program – Report 3 (ACRP-3). Analysis of Aircraft Overruns and Undershoots for Runway Safety Areas. Washington, 2008
- [v] Civil Aviation Authority. CAP 776 – Global Fatal Accident Review 1997-2006. West Sussex, julio de 1998
- [vi] Government of California, Department of Transportation. California Airport Land Use Planning Handbook. California, enero de 2002.
- [vii] US Department of Transportation. Location of Commercial Aircraft Accidents/Incidents Relative to Runway. Washington, Julio de 1990.
- [viii] Analysis of Ground Hazards Due to Aircraft And Missiles. Solomon, K.A.. RAND Corporation. Junio, 1988
- [ix] National Aerospace Laboratory (Nationaal Luchten Ruimtevaartlaboratorium - NLR). A causal model for the assessment of third party risk around airports. Netherlands, abril de 2000.
- [x] National Air Traffic Services. Third Party Risk near Airports and Public Safety Zone Policy. NATS, Londres, junio de 1997.
- [xi] Department Of Energy. (Mayo 2006). DOE STANDARD 3014-2006 Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facilities. Washington, DC 20585
- [xii] Data Development Technical Support Document for the Aircraft Crash Risk Analysis Methodology (ACRAM) Standard. Kimura, C.Y.; Glaser, R.E. y otros. UCRL-ID-124837. Lawrence Livermore National Laboratory. Agosto 1996.
- [xiii] Eisenhut, D. G., "Reactor Siting in the Vicinity of Mcfields," Trans. Nucl. Soc. 16~210-211, Chicago. Junio 1973.
- [xiv] Evaluation Of Aircraft Crash Hazards Analyses For Nuclear Power Plants. Kot, C . A. ; Lin, H. C .; van Erp, J. 8.; Eichler, T. V.; Wiedermann A. H. ANL-CT-01-32 / NUREG-CR-2859. Argonne National Laboratory. Septiembre 1982.

[xv] Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facilities: A Statistical Primer.  
Rock, J.C. ANRCP-1998-20. Amarillo National Resource Center for Plutonium.  
Diciembre, 1998.