

05/2014

04 enero de 2014

*Juan Pablo Somiedo\**

UNA APROXIMACIÓN AL ANÁLISIS  
DE RIESGOS ADVERSARIOS (ARA)  
APLICADO A LA LUCHA  
CONTRATERRORISTA

[Visitar la WEB](#)

[Recibir BOLETÍN ELECTRÓNICO](#)

## UNA APROXIMACIÓN AL ANÁLISIS DE RIESGOS ADVERSARIOS (ARA) APLICADO A LA LUCHA CONTRATERRORISTA

### Resumen:

La complejidad del fenómeno del terrorismo actual y sus desafíos hace cada vez más necesaria la implementación de herramientas de análisis que ayuden a la toma de decisiones. El presente artículo es una aproximación y una revisión de las aportaciones del modelo de Análisis de Riesgos Adversarios (ARA), a la lucha contraterrorista. Redactado cuando se celebra el Año Internacional de la Estadística, también destaca la importancia del área de Investigación Operativa Militar en las FAS y las aportaciones de la estadística al ámbito de la seguridad y la defensa en general.

### Abstract:

*The complexity of the phenomenon of terrorism today and its challenges does necessary to implement analysis tools to assist decision making. This article is an approach and a review of the contributions Adversarial Risk Analysis Model (ARA), to the counterterrorism fight. Written when celebrating the International Year of Statistics, also highlights the importance of the Military Operations Research area in the FAS and the statistical contributions to the field of security and defense in general.*

### Palabras clave:

Contraterrorismo, investigación operativa militar, análisis de riesgos adversarios, estadística, modelos ARA.

### Keywords:

*Counterterrorism, military operational research, adversarial risk analysis, statistics, ARA models.*

**\*NOTA:** Las ideas contenidas en los **Documentos de Opinión** son de responsabilidad de sus autores, sin que reflejen, necesariamente, el pensamiento del IEEE o del Ministerio de Defensa.

**INTRODUCCIÓN:**

*“Mide lo que se pueda medir; y lo que no, hazlo medible”*

**Galileo Galilei**

Fue Pitágoras quien descubrió en torno al del 600 a.C la relación entre la música y las matemáticas. Esto se denominó armonía pitagórica y fue la primera vez que se relacionaron las matemáticas con el mundo físico. Desgraciadamente esa relación se olvidó. Unos 1000 años después fue Galileo Galilei quien lo comprendió. En su libro “Il Saggiatore” escribió: “El verdadero conocimiento está escrito en un enorme libro abierto continuamente ante nuestros ojos, me refiero al universo. Pero uno no puede entenderlo. Uno debe aprender la lengua y a reconocer los caracteres para poder entender el lenguaje en el que está escrito. Está escrito en el lenguaje de las matemáticas”<sup>1</sup>. Desde entonces las matemáticas han estado casi omnipresentes en todas las ciencias, pero ha sido la actual abundancia de información la que ha puesto de relieve la importancia de una rama de las matemáticas para analizar dicha información y acotar la incertidumbre ante la toma de decisiones. Esa rama matemática no es otra que la estadística<sup>2</sup>, que este año 2013 celebra su año internacional con eventos, conferencias y talleres en muchas universidades españolas y europeas.

Sin embargo, el genio italiano se arriesgó en la frase a él atribuida y que encabeza este trabajo. La frase está escogida a propósito para dar pie a la reflexión del lector sobre los peligros que subyacen en la metrización de la información cualitativa usada habitualmente tanto en inteligencia estratégica con el análisis de hipótesis en competencia (ACH) como en prospectiva con el análisis estructural de variables (MICMAC) y el análisis de actores (MACTOR). Como escribió el sociólogo Sorokin en su obra “*Las modas y las manías de la sociología moderna*”, muchas veces estas metrificaciones se convierten en una forma de cuantificar nuestras opiniones subjetivas minando irremediablemente todo el proceso posterior de análisis y las conclusiones. (Parra, 1992, p.76). Intentar cuantificar la información cualitativa, pues, entraña riesgos con los que el analista debe ser capaz de lidiar.

---

<sup>1</sup> “La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto”. Galileo Galilei, *Il Saggiatore*, Cap. VI

<sup>2</sup> Existe un amplio debate sobre si debe considerarse a la Estadística como una rama propia o debe considerársela como una hija de la matemática. De lo que no cabe duda es de su creciente importancia. Como muestra, Hal Varian, director financiero de Google ha vaticinado que la de estadístico será la profesión más “sexy” para el próximo decenio.

En el ámbito militar y estratégico el uso de la estadística y la probabilidad no es ni mucho menos algo nuevo. Fue Clausewitz quien indicó en sus escritos que "la [guerra](#), por su [naturaleza](#) objetiva, es un [cálculo](#) de probabilidades. Solamente hace falta un factor más para que se torne en [juego](#), y ciertamente ese factor no falta: es el azar". (Clausewitz, Libro I, Cap I). Esta alianza singular entre la estadística y la guerra tomó el nombre de Investigación Militar de Operaciones. Ya en el año 1898 Ladislao Bortkiewicz encontró una aplicación práctica a la distribución de Poisson cuando se le encargó la tarea de investigar el número de soldados que habían muerto en el ejército prusiano a consecuencia de las coces de los caballos<sup>3</sup>. Más cercana en el tiempo, durante la II Guerra Mundial, encontramos a los analistas del *Grupo de Investigación de Operaciones de Guerra Antisubmarina de Estados Unidos* (ASWORG, por sus siglas en inglés). La historia y los entresijos de este grupo de investigación aparecen reflejados en las obras de Charles R. Shrader y Arjang A. Assad que figuran en el apartado bibliográfico de este artículo.

Los analistas de ASWORG, estadísticos en su mayor parte, hicieron representaciones matemáticas de los convoyes de barcos de suministros a Gran Bretaña. En la elaboración de los modelos se tuvieron en cuenta una serie de restricciones, de condiciones impuestas por la realidad. Los barcos no podían desplazarse más allá de cierta velocidad, por ejemplo, y debían transportar alimentos y combustibles suficientes para llegar a su destino. Tenían que evitar los icebergs. Los analistas también tomaron en cuenta las estadísticas de los U-boats: el tamaño de su flota, el alcance de los submarinos, sus torpedos, etc. Con base a esta información fueron capaces de modelar la guerra naval. La flota del Atlántico norte existía en el modelo como una red de relaciones estadísticas. A medida que los analistas jugaban con la flota en el modelo, las probabilidades cambiaban. Cuando la armada de los EEUU puso en práctica las fórmulas del modelo, la destrucción de barcos disminuyó casi instantáneamente.

Aún podemos encontrar en la web uno de los muchos informes que elaboraron<sup>4</sup>. En él, con fecha de Abril de 1944, se analizan las condiciones de respuesta de los bombarderos ante los ataques de los U-boats. La ASWORG fue creciendo hasta contar con un total de 73 analistas y en 1944 fue rebautizada con el nombre de *Operations Research Group (ORG)* y reasignada a la división del Comando de la Flota. Muchos de los analistas retornaron a sus ocupaciones civiles, pero algunos de ellos se quedaron y contribuyeron a modernizar la navy.

Dos padres de la investigación operativa, los norteamericanos Morse y Timbal, la definen como "un método científico capaz de suministrar a los estamentos ejecutivos una base

---

<sup>3</sup> El autor ha realizado la comprobación del ajuste de los datos recogidos con la distribución Poisson con la ayuda del software estadístico R. Dicha comprobación figura en un anexo de este artículo.

<sup>4</sup> <http://www.uboatarchive.net/ASWORGReport27.htm>.

cuantitativa para la toma de decisiones en las operaciones de su responsabilidad” (Morse y Kimball, 2006, p.1)

La investigación operativa militar en España es relativamente reciente. Una orden del 20 de Abril de 1965 creaba en las FAS el servicio de Investigación militar operativa. Define la pertinencia e importancia de la creación de este servicio de esta forma:

“La creciente complejidad en la dirección de los ejércitos y el empleo de modernas tácticas obliga a que los mandos precisen recurrir al apoyo que proporcionan los métodos científicos para solventar numerosos problemas o situaciones en sus aspectos estratégicos, tácticos, logísticos y económicos. La Investigación Operativa permite presentar al mando, mediante la utilización de técnicas modernas y en forma clara y de fácil comprensión las diversas soluciones posibles que admite todo problema, con las ventajas e inconvenientes que cada alternativa puede originar, en forma tal, que el Mando, “único a quien corresponde la decisión”, pueda, discriminándolas, decidir la línea de acción que estime conveniente”. (General Navarro Ibáñez, 1965, p. 3)

Tres años antes, en el curso 1962-63, la Escuela de Estadística de la Universidad de Madrid, comenzó a impartir por primera vez las asignaturas correspondientes a la Rama de Investigación Operativa. Allí se formó un grupo importante de investigaciones operativas de procedencia militar. La asignatura de Seminario de investigación operativa (sección militar) la dirigía el profesor Sixto Ríos en calidad de Marino de Guerra y Licenciado en Ciencias Exactas. Por ese Seminario pasaron muchos oficiales de los diferentes ejércitos para la obtención del diploma de investigación operativa (Chicarro, 1985, pp. 89-90).

Los órganos de Planificación y Ejecución de la Investigación Operativa en las FAS son los siguientes:

1. Centro de Investigación Operativa de la Defensa
2. Gabinete de Investigación Operativa del Ejército de Tierra
3. Gabinete de Investigación Operativa de la Armada
4. Gabinete de Investigación Operativa del Ejército del Aire
5. Comisión Ministerial de investigación Operativa del Ministerio de Defensa (COMIODEF).

De forma ilustrativa nos detendremos en el Gabinete de Investigación Operativa de la Armada (GIMO). En noviembre de 1968 se aprobó el Reglamento del Servicio de Investigación Militar Operativa en el que se daban normas de tipo general a las que debía

ajustarse cada Ejército y el 24 de diciembre de ese mismo año nacía, en su configuración definitiva, el Gabinete de Investigación Operativa de la Armada (GIMO) bajo la dirección del entonces teniente coronel de Intendencia Mateo Fernández-Chicarro. En reconocimiento a su labor, el Ministerio de Defensa creó el Premio en Investigación Operativa “General Fernández-Chicarro”

La misión del GIMO consiste en colaborar con cualquier institución de la Armada, aportando los conocimientos y medios de que dispone para la solución de problemas. Tras el estudio de la solicitud, y si resultase procedente y viable abordar el trabajo, se le comunica al solicitante para que realice una petición formal por el conducto reglamentario. A partir de ese momento se asigna el trabajo a alguno de los oficiales, el cual puede mantener comunicación directa con la persona designada por la autoridad peticionaria, lo cual aporta gran fluidez al progreso del trabajo. (Meifren, 2006, pp. 15-16)

Más reciente en el tiempo, una Orden del BOD<sup>5</sup> con fecha 10 de Diciembre de 2009, aprobaba el Reglamento del Servicio de Investigación Operativa del Ministerio de Defensa. En ella se establece la Comisión Ministerial de Investigación Operativa del Ministerio de Defensa (COMIODEF) como el órgano colegiado asesor de carácter técnico del Jefe de Servicio de Investigación Operativa del Ministerio de Defensa. De igual forma se establece que la obtención del Diploma en Investigación Operativa Militar, requisito para desarrollar esas actividades en el ámbito militar, queda reservado al personal militar de los diferentes Ejércitos<sup>6</sup>.

## 1. LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS APLICADOS AL CAMPO DE LA SEGURIDAD Y LA DEFENSA.

“Cada resquicio puede, eventualmente, ser explotado; cada laguna finalmente se cerrará”. Esta frase, escrita por David Gelernter en un artículo titulado “*The law of the loopholes in action*” para los Angeles Times, bien podría resumir la constante lucha de las fuerzas y cuerpos de Seguridad del Estado con los terroristas<sup>7</sup>. Los terroristas encuentran lagunas en la seguridad vía continua exploración, que, una vez descubiertas, requieren medidas defensivas para cubrirlas por parte de las fuerzas y cuerpos de seguridad. El problema, por supuesto, es que es imposible defender todos los posibles objetivos todo el tiempo y precisamente por esto es imprescindible implementar también estrategias ofensivas para

<sup>5</sup> <http://www.boe.es/boe/dias/2009/12/18/pdfs/BOE-A-2009-20298.pdf>

<sup>6</sup> En Estados Unidos, la Military Operations Research Society (MORS) trata de estimular y obtener sinergias beneficiosas con los analistas del ámbito civil: <http://www.mors.org/>. Su grupo de LinkedIn es punto de encuentro de analistas estadísticos de diferentes procedencias y puede comprobarse su intensa actividad casi día a día. La misma función cumple la sección de estadísticas en Defensa y Seguridad Nacional de la Asociación americana de Estadística: <http://www.amstat.org/sections/sdns/>.

<sup>7</sup> <http://articles.latimes.com/2005/may/06/opinion/oe-gelernter6>

intentar lograr la inoperatividad del adversario. La cuestión es cómo identificar las estrategias defensivas y ofensivas y las tácticas más efectivas.

La estadística ha demostrado ser una poderosa herramienta en esa lucha continua y sin tregua. Hoy en día podemos encontrar estadísticos y matemáticos trabajando en casi todas las áreas vinculadas con la seguridad y la defensa, desde la investigación operativa militar, pasando por agencias de inteligencia como la NSA o la misma CIA<sup>8</sup> hasta llegar a la inteligencia financiera y económica por poner solo algunos ejemplos. Los campos de aplicación son también diversos. Algunos de ellos son la minería de datos y textos, el análisis de redes, la autenticación biométrica de imágenes faciales o el bioterrorismo y la Biovigilancia.

Un ejemplo de aplicación podemos encontrarlo en el artículo de Aaron Mannes que en el 2008 publicó la revista *Journal of International Policy Solutions*. El artículo, titulado “*Testing the snake head Strategy: Does killing or Capturing its leaders reduce a terrorist group’s activity*”, estaba basado en un análisis estadístico. De manera convencional es aceptado que la eliminación de los líderes de una organización es una estrategia eficaz en la lucha contraterrorista, pero el análisis cuantitativo nos aporta otra perspectiva. La mayoría de los éxitos se centran en casos específicos como el colapso de Sendero Luminoso en Perú después de que se retiraran sus líderes. Pero también hay ejemplos en sentido contrario como el aumento de la letalidad y la eficacia después de que Israel eliminara en 1992 al secretario general de Hezbollah, Abbas Musaw.

El trabajo examinó sesenta casos de líderes terroristas eliminados bien por su muerte directa o por ser capturados y encarcelados. El autor reunió datos sobre incidentes y muertes en los períodos de cinco años antes y después de que las organizaciones perdieran a su líder y los comparó con los datos de 21 grupos terroristas que no habían perdido a su líder. Las conclusiones obtenidas fueron que había una tendencia hacia un menor número de incidentes después de que un grupo terrorista perdiera a su líder, una tendencia que se incrementaba cuando un determinado grupo terrorista perdía a su líder más de una vez. Pero, por otro lado, el número de víctimas mortales de los grupos islamistas aumentaban después de haber perdido a su líder que aumentaban si en lugar de su detención, el líder resultaba muerto.

---

<sup>8</sup> Entre los perfiles analíticos demandados por la CIA destacan el de Analista Metodológico, cuya misión es desarrollar y aplicar métodos analíticos para añadir rigor y precisión al análisis de inteligencia y a la recolección y proporcionar la investigación estadística, operaciones, econométrico, matemática, modelado geoespacial, o el apoyo a la investigación análisis de la Agencia. Otro perfil relacionado con la estadística es el de Científico de Datos, cuya misión es ayudar a organizar e interpretar grandes volúmenes de datos. La información puede ampliarse consultado la web de la CIA en el apartado de Careers:

<https://www.cia.gov/careers/opportunities/analytical/view-jobs.html>

Hay que señalar, sin embargo, que ninguno de estos hallazgos constituye una roca sólida pues hay muchos otros factores que podrían afectar a la actividad del grupo terrorista. En particular, el aumento de los asesinatos cometidos por grupos islamistas después de que su líder es eliminado podrían reflejar que la muerte se produjo en un contexto de guerra a gran escala como Chechenia o Argelia.

Llegados a este punto, los resultados del trabajo no pueden mostrarse como concluyentes pero suponen una primera aproximación nada despreciable. El autor concluye su trabajo con una cita de Anna Karenina: “Las familias felices son todas iguales, cada familia infeliz es infeliz a su manera”. Al igual que las familias infelices, los grupos terroristas se diferencian de los demás y la búsqueda de patrones comunes para todos puede no ser una buena idea. Independientemente de los resultados cuantitativos, la decapitación de líderes se mantendrá como una estrategia contra el terror. Si una prueba cuantitativa puede ayudar a indicar dónde y cuándo es más probable que sea eficaz esta acción sin resultados nocivos, puede ayudar a administrar los recursos antiterroristas escasos y evitar situaciones en las que esta estrategia puede ser contraproducente (Mannes, 2008, p.44)

## **2. MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGOS ADVERSARIOS APLICADO A LA LUCHA CONTRATERRORISTA.**

El modelo de “Adversarial Risk Analysis for Counterterrorism Modeling” (ARA) tuvo su origen en el esfuerzo conjunto de tres profesores mientras participaban en el programa “Risk análisis, extreme events and decisión theory” en el SAMSI (Statistical and Applied Mathematical Sciences Institute), un proyecto colaborativo de varias universidades de Estados Unidos<sup>9</sup>. Los resultados se plasmaron en un artículo publicado en el Jasa (Journal of the American Statistical Association). Los autores son David Banks, Jesús Ríos y el profesor español David Ríos Insúa. Se ha estudiado su aplicación a protección de infraestructuras críticas como aeropuertos y redes de transporte, a casos de secuestro de buques pesqueros por parte de piratas en Somalia y a la ciberseguridad y está prevista la publicación de un libro durante el próximo año que reflejará los avances en estas investigaciones.

La caída del Muro de Berlín no sólo significó el final de la Guerra Fría sino también el comienzo de un nuevo modelo de conflictos. Los adversarios o enemigos son ahora difusos. Ya no hablamos de conflictos simétricos entre dos naciones o ejércitos bien definidos y localizados geográficamente. Ahora los conflictos han adquirido un perfil asimétrico, global y cambiante. La mayoría de ellos son intraestatales (se desarrollan dentro del propio estado) y

---

<sup>9</sup> <http://www.samsi.info/>

no interestatales (entre dos estados). Los adversarios no son fácilmente identificables, sino más bien difusos. Son grupos y entidades no gubernamentales y son diferentes a los estados en términos de capacidades, tácticas, motivaciones, fuerzas y vulnerabilidades, por lo que se torna más difícil y complejo predecir sus intenciones y objetivos. Los estados tienen la obligación de mantener sus capacidades operativas para lidiar con los conflictos simétricos y, mientras, deben arreglárselas para protegerse de este nuevo tipo de enemigos no gubernamentales. (Wainfan, 2010, p.1).

Una característica clave cuando nos enfrentamos con problemas que tiene que ver con la lucha contraterrorista es la presencia de dos o más oponentes inteligentes que buscan completar sus objetivos y que tienen que tomar decisiones cuyos resultados están cargados de incertidumbre. La teoría de los juegos asume que los jugadores se comportan de una forma racional, lo cual no siempre sucede. En el famoso documental-entrevista *"The fog of the war"*, Robert Macnamara, que fue secretario de Defensa del gobierno de los EE.UU durante siete años, sostiene: "Tanto Fidel Castro como Kennedy eran personas racionales, pero ambos estuvieron a punto de iniciar una guerra nuclear". La conclusión a esta reflexión es que los seres humanos somos animales racionales, pero no siempre nos comportamos racionalmente. La teoría de los juegos no está diseñada para predecir nada que se escape a la pura racionalidad. Pero esto, más que una crítica, es una delimitación válida de sus propósitos y objetivos.

El modelo ARA trata de modelizar esta incertidumbre en un marco teórico bayesiano<sup>10</sup> a través de la utilización de dos herramientas diferentes y complementarias: el análisis de riesgos y la teoría de los juegos. El análisis de riesgos permite la evaluación de riesgos mediante la formulación de todos los elementos del problema, identificando diferentes eventos y asociándoles probabilidades. La teoría de los Juegos es un área de la matemática aplicada destinada a estudiar procesos de toma de decisiones en donde dos o más actores racionales compiten por lograr sus intereses de un espacio de decisión común. Por lo demás, cabe señalar que hay tres tipos de juegos de suma cero que han demostrado ser de interés militar y se han utilizado extensamente en la planeación y en la evaluación de armamento. Estos juegos son: juegos de asignación, duelos y juegos de persecución o búsqueda. El ejemplo más popular y que frecuentemente se usa como ejemplo es el "juego del Coronel Blotto"

---

<sup>10</sup> Cabe señalar, aunque sea de pasada, la utilidad del enfoque bayesiano en el análisis de inteligencia. Podemos encontrar un enfoque teórico en *"Bayesian reasoning method for Intelligence using natural frequencies"* de Jennifer Lynn Lee: <http://www.scip.org/files/Resources/Lee-Bayesian-Reasoning-Method.pdf> y una aplicación práctica sobre la proliferación de misiles de crucero en *"Cruise missile proliferation: an application of bayesian análisis to intelligence forecasting"* de Michael William Gannon: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a257717.pdf>

La metodología del trabajo trata de demostrar la utilidad de ARA para apoyar a uno de los participantes, el Defensor, a través de tres importantes modelos utilizados en contraterrorismo: el modelo Defensa- Ataque simultáneo, el modelo secuencial Defensa-Ataque-Defensa y el modelo secuencial Defensa-Ataque con información privada. Para cada uno de estos modelos se elaboran diagramas de árbol para evaluarlos en la teoría de juegos estándar<sup>11</sup> y en una etapa posterior se propone la solución ARA correspondiente. (Ríos y Ríos, 2012, p.3). Examinaremos a continuación el modelo Defensa-Ataque- Defensa secuencial para ilustrar la metodología general seguida. Lo haremos de forma resumida, pero el lector puede encontrar el desarrollo de cada uno de los modelos de forma ampliada en los trabajos del profesor David Ríos que figuran en el apartado bibliográfico.

### 2.1. Modelo Defensa-Ataque- Defensa secuencial

En este modelo, el defensor despliega en primer lugar recursos defensivos; realiza una determinada elección encaminada a posicionarse ante la posible amenaza terrorista, sentando las bases para una futura acción defensiva frente a los resultados de un posible ataque. El Atacante, después, de haber observado tal estrategia defensiva del defensor, evaluará sus opciones y llevará a cabo un ataque. Finalmente, el defensor intentará recuperarse de ese ataque llevando a cabo una segunda acción defensiva.

Suponemos que tanto el defensor como el atacante tienen, respectivamente, conjuntos de varias alternativas discretas  $D = \{d1, d2, \dots, dm\}$  y  $A = \{a1, a2, \dots, ak\}$  y la única incertidumbre relevante es  $S$ , que marcan el éxito ( $S = 1$ ) o el fracaso del ataque ( $S = 0$ ). Para cada participante se evalúa la probabilidad de éxito del ataque y la defensa y se representa en los diagramas.

Con esta información ya podemos construir el diagrama de influencia y el árbol de decisión correspondientes a nuestro problema. Esto nos ayudará a visualizar el problema en su conjunto. Un diagrama de influencia (DI) es un grafo acíclico dirigido con tres clases de nodos: nodos de decisión, que se muestran como cuadrados; nodos de azar o incertidumbre, mostrados como círculos; y nodos de valor, que se muestran mediante hexágonos. Además un DI puede tener tres tipos de arcos en función del destino de los mismos: si llega a un

---

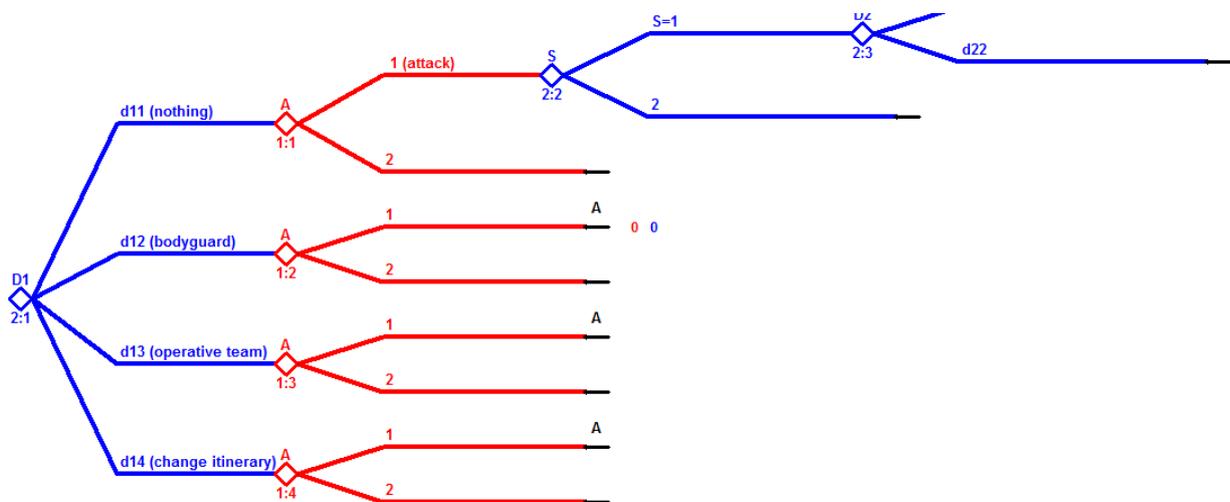
<sup>11</sup> Personalmente me permito sugerir al lector la utilización de la herramienta GAMBIT, que es un software libre. "Gambit" permite a los analistas entrenarse en la resolución de juegos y además tiene una excelente ayuda explicativa on-line. Sin embargo, no todo podían ser ventajas, y, frecuentemente, para algunos juegos complejos, el programa se colapsa al intentar calcular todos los equilibrios. En estos casos hay que elegir "Compute as many Nash equilibria as possible" en el cuadro de ordenes correspondiente. A este respecto es aconsejable guardar tu modelo lo más frecuentemente que sea posible.

nodo de decisión, indica que la decisión se toma conociendo el valor del antecesor; a un nodo de azar, que la incertidumbre depende del nodo antecesor mediante probabilidad condicionada; o a un nodo de valor, que la utilidad reflejada en ese nodo de valor depende de los valores de los antecesores.

## 2.2. Análisis mediante Teoría de los Juegos

En la teoría de los juegos y más concretamente a lo que se refiere a los juegos no cooperativos en forma estratégica, existen algunos conceptos básicos que es necesario

Ilustración 1: Diagrama de árbol incompleto elaborado por el autor para un caso de secuestro con el programa Gambit



conocer. Dos de ellos son la información y el punto de equilibrio. Dentro de la teoría de los juegos podemos distinguir varios tipos posibles de información:

- **Información completa vs incompleta:** se refiere a si cada jugador conoce o desconoce los siguientes puntos:
  - a)Cuál es el conjunto de jugadores
  - b) Todas las acciones que pueden llevar a cabo los jugadores
  - c) Todos los resultados potenciales de los jugadores

Esencialmente, sólo se tiene información completa si se conocen los tres puntos. Si se desconoce alguno de ellos hablamos, entonces, de información incompleta.

- **Información perfecta vs imperfecta:** la primera se da si el conjunto de información en el juego se compone sólo de un nodo. Si no es el caso y hay más de un nodo hablamos de información imperfecta.
- **Memoria perfecta vs memoria imperfecta:** la primera se da cuando el jugador recuerda todos los movimientos pasados que ha elegido o seleccionado. De no cumplirse esto hablamos de memoria imperfecta.

En nuestro modelo suponemos que la información es completa y la memoria es perfecta. Una vez definidos estos conceptos básicos sobre los que pivotan los juegos no cooperativos,

podemos adentrarnos en la resolución de nuestro problema. El enfoque de la teoría de juegos para resolver el problema planteado requiere la obtención de la función de utilidad del Defensor  $u_D(d_1, s, d_2)$  y la función de utilidad del Atacante  $u_A(a, s, d_2)$  así como de la evaluación de las probabilidades del suceso  $S | d_1, a$ , para cada uno de los participantes, y que designaremos como  $p_D(S | d_1, a)$  y  $p_A(S | d_1, a)$ , para el Defensor y el Atacante respectivamente. El modelo requiere como suposición inicial que las utilidades y probabilidades del Atacante sean conocidas por el Defensor y que el Atacante conozca también las probabilidades y utilidades del Defensor, siendo todo esto conocimiento común. Si esto sucede, puede obtenerse una solución del problema a partir del árbol de decisión mediante inducción hacia atrás como sigue:

- En el nodo  $D_2$ , la mejor respuesta del defensor para cada par  $(d_1, s) \in D_1 \times S$  es la que maximice su utilidad:

$$d_2^*(d_1, s) = \max_{d_2 \in D_2} u_D(d_1, s, d_2)$$

- Bajo la hipótesis de conocimiento común, el atacante puede anticipar el comportamiento del defensor en el nodo  $D_2$ . Por tanto, en el nodo  $S$  es de conocimiento común para ambos participantes tanto la utilidad esperada del Defensor asociada a cada par  $(d_1, a) \in D_1 \times A$   $\psi_D(d_1, a) = u_D(d_1, S=0, d_2^*(d_1, S=0)) \cdot p_D(S=0 | d_1, a) + u_D(d_1, S=1, d_2^*(d_1, S=1)) \cdot p_D(S=1 | d_1, a)$  como la utilidad esperada del Atacante asociada a  $(d_1, a) \in D_1 \times A$   $\psi_A(d_1, a) = u_A(d_1, S=0, d_2^*(d_1, S=0)) \cdot p_A(S=0 | d_1, a) + u_A(d_1, S=1, d_2^*(d_1, S=1)) \cdot p_A(S=1 | d_1, a)$

Conociendo lo que el Defensor hará en el nodo de decisión  $D_2$ , el Atacante puede determinar cual es su mejor ataque en el nodo  $A$ , después de observar la primera acción defensiva del Defensor  $d_1 \in D_1$  resolviendo el problema:

$$a^*(d_1) = \max_{a \in A} \psi_A(d_1, a)$$

- Conocido esto también por el Defensor, debido a la hipótesis de conocimiento común, el Defensor puede encontrar su mejor decisión en el nodo de decisión  $D_1$ , resolviendo el problema:

$$d_1^* = \max_{d_1 \in D_1} \psi_D(d_1, a^*(d_1))$$

Así, bajo la hipótesis de conocimiento común, la teoría de juegos predice que el Defensor elegirá  $d_1^* \in D_1$  en el nodo  $D_1$ ; entonces el Atacante responderá eligiendo el ataque  $a^*(d_1^*) \in A$ , y, finalmente, el Defensor después de observar  $s \in S$ , escogerá  $d_2^*(d_1^*, s) \in D_2$

en el nodo  $D_2$ . La terna  $(d_1^*, a^*(d_1^*), d_2^*(d_1^*, s))$  determina una solución del juego que es un equilibrio de Nash.

### 2.3. Análisis mediante ARA

Para realizar esta etapa del análisis abandonamos la hipótesis de conocimiento común, ajustándonos un poco más a lo que sucede en la realidad. Teniendo esto en cuenta realizamos un análisis ARA en apoyo al defensor. Para ello, tratamos el comportamiento del Atacante en el nodo  $A$  como de incertidumbre desde el punto de vista del Defensor y modelizamos esa incertidumbre. Esto se refleja en el diagrama de influencia y en el árbol de decisión, pues el nodo de decisión del Atacante se convierte en un nodo de azar reemplazando el cuadrado por un círculo. Ahora necesitamos obtener  $p_D(A|d_1)$ , la probabilidad que el Defensor asignará al ataque que escogerá el Atacante, una vez haya observado cada primer movimiento defensivo  $d_1 \in D_1$  suyo. El Defensor también necesita evaluar  $u_D(d_1, s, d_2)$  y  $p_D(S|d_1, a)$ , ya descritos anteriormente.

Evaluados estos datos, el defensor puede resolver su problema de decisión por inducción hacia atrás. Puede determinar en el nodo  $D_2$  la acción que le proporcione mayor utilidad esperada para cada par  $(d_1, s) \in D_1 \times S$ , de la misma forma que en el enfoque anterior:

$$d_2^*(d_1, s) = \max_{d_2 \in D_2} u_D(d_1, s, d_2)$$

Después, el Defensor obtendrá su utilidad esperada en el nodo  $S$ ,  $\psi_D(d_1, a)$ , para cada par  $(d_1, a) \in D_1 \times A$  de la misma forma que en el enfoque anterior. Es en este momento cuando el Defensor puede utilizar la evaluación de la probabilidad sobre lo que el Atacante hará ante cada primera elección suya,  $p_D(A|d_1)$ , para determinar su utilidad esperada en el nodo  $A$  para cada  $d_1 \in D_1$ ,

$$\psi_D(d_1) = \sum_{i=1}^p \psi_D(d_1, a_i) p_D(A = a_i | d_1)$$

Finalmente, el Defensor puede encontrar la decisión que maximice su utilidad esperada en el nodo  $D_1$  resolviendo el problema

$$d_1^* = \max_{d_1 \in D_1} \psi_D(d_1)$$

La clave ahora está en cómo evaluar  $p_D(A|d_1)$ . Para hacerlo el Defensor puede utilizar algún método estadístico si se disponen de datos históricos sobre el comportamiento del

Atacante es situaciones similares y, para complementar esa evaluación, podría también incorporar la opinión de expertos. Sin embargo, proponemos modelizar la incertidumbre que el Defensor tiene sobre la decisión del Atacante suponiendo que el Atacante desea maximizar su utilidad esperada y suponiendo también que la incertidumbre del Defensor para evaluar esa probabilidad se deriva de la incertidumbre que el Defensor tiene sobre las probabilidades y utilidades del Atacante asociadas al problema de decisión del Atacante. En definitiva, la evaluación de  $p_D(A | d_1)$  se limita a analizar el problema de decisión del Atacante desde el punto de vista del Defensor. La evaluación de las probabilidades y utilidades del Atacante desde la perspectiva del Defensor estarán basadas en toda la información que el Defensor tenga disponible, la cual puede incluir datos previos de situaciones similares y la opinión de expertos (Ríos y Ríos, 2012, pp. 9-10)

El defensor puede reconocer su incertidumbre sobre ellas mediante una distribución de probabilidad

$$F = (U_A(a, s, d_2), P_A(S | d_1, a), P_A(D_2 | d_1, s))$$

y resolver el problema de decisión del atacante usando inducción hacia atrás sobre el árbol de decisión como sigue:

- En el nodo  $D_2$

$$\Psi_A(a, s) \rightarrow \Psi_A(d_1, a, s) = \sum_{l=1}^n U_A(a, s, d_{2l}) P_A(D_2 = d_{2l} | d_1, a)$$

- En el nodo  $S$

$$(d_1, a) \rightarrow \Psi_A(d_1, a) = \Psi_A(d_1, a, S=0) P_A(S=0 | d_1, a) + \Psi_A(d_1, a, S=1) P_A(S=1 | d_1, a)$$

- En el nodo A, suponiendo que el atacante desea maximizar su utilidad esperada, la distribución del defensor sobre la elección del atacante cuando el defensor ha considerado su defensa  $d_1$  es

$$P_D(A = a | d_1) = P_F[a = \max_{x \in A} \Psi_A(d_1, x)], \forall a \in A$$

Esta distribución podría aproximarse usando métodos de simulación Montecarlo generando  $n$  valores

$$(\Psi_A^k(a, s, d_2), p_A^k(S | d_1, a), p_A^k(D_2 | d_1, s))_{k=1}^n \sim F$$

A partir de esos datos, en el nodo  $D_2$  hacemos

$$\Psi_A(a, s) \rightarrow \varphi_A^k(d_1, a, s) = \sum_{l=1}^n u_A^k(a, s, d_{2l}) p_A^k(D_2 = d_{2l} | d_1, a)$$

En el nodo S

$$(d_1, a) \rightarrow \varphi_A^k(d_1, a) = \varphi_A^k(d_1, a, S=0) p_A^k(S=0 | d_1, a) + \varphi_A^k(d_1, a, S=1) p_A^k(S=1 | d_1, a)$$

generando  $\varphi_A^k(d_1, a)_{k=1}^n$  y aproximando  $p_D(A = a | d_1)$  mediante:

$$\hat{p}_D(A = a | d_1) = \frac{\# \hat{a}_1 = \max_{x \in A} \varphi_A^k(d_1, x)}{n}, \forall a \in A$$

En este apartado hemos tratado de sintetizar los pasos metodológicos fundamentales del marco analítico empleado en el análisis ARA desde un punto de vista teórico, pero aplicable después a casos concretos. Una vez más, y para una mayor profundización, remitimos a la lectura del artículo conjunto del profesor David Ríos y Jesús Ríos que figura en el apartado bibliográfico.

Aunque los mismos autores reconocen al final de su artículo la imposibilidad de modelar todos los escenarios derivados de la toma de decisiones en un espacio de incertidumbre, debemos reconocer que la creación de este marco conceptual era, cuando menos, necesario y constituye una excelente aproximación a la problemática abordada.

#### ANEXO:

##### **Comprobación del ajuste de los datos de los soldados prusianos muertos por coces de caballo a la distribución Poisson utilizando el programa estadístico R.**

Uno de los ejemplos más clásicos sobre el uso de la distribución de Poisson es el del ajuste del número de muertes por coces de caballos en el ejército prusiano. En 1898 Bortkiewicz realizó un estudio sobre el número de muertes al año por coces de caballos que se habían producido en 10 secciones del ejército de Prusia durante 20 años. Fue el primero en observar que la ocurrencia de sucesos en pequeñas frecuencias en una población amplia pueden ajustarse mediante una distribución de Poisson, lo que denominó “ley de los pequeños números”. La distribución de frecuencias de estos datos aparece en el cuadro siguiente:

MUERTES AL AÑO	FRECUENCIAS
0	109
1	65
2	22
3	3
4	1

Lo que se planteaba en aquella época es si este tipo de accidentes mortales se producían por puro azar en las distintas secciones o si había alguna causa que implicara un mayor número

de muertes en algunos casos concretos. Esa cuestión del puro azar equivale a plantearse si la distribución de Poisson es adecuada para la variable considerada.

Primero, generamos estos datos a partir de la tabla de frecuencias:

```
> DatosCoces<-data.frame(Muertes=c(rep(0,109),rep(1,65),rep(2,22),rep(3,4),4))
```

A continuación estimamos el parámetro de la distribución de Poisson:

```
> ajuste.poisson<-fitdistr(DatosCoces$Muertes,"Poisson")  
> lambda<-ajuste.poisson$estimate
```

Si queremos ver el resultado completo, ejecutamos ajuste.poisson:

```
> ajuste.poisson  
lambda  
0.62189055 (0.05562358)
```

Obtenemos que el Estimador de Máxima Verosimilitud de lambda es (0.61) y su error estándar es (0.55)

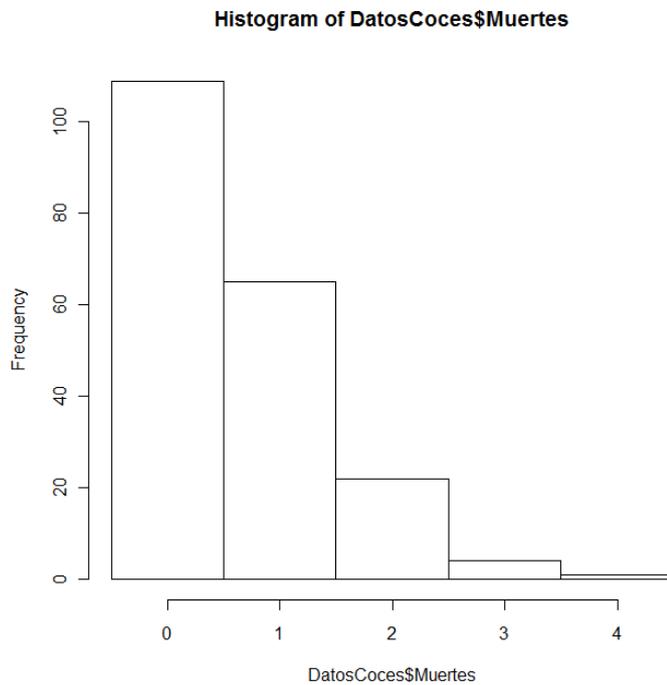
A continuación, vamos a ajustar los datos de la distribución de frecuencias anterior mediante una distribución de Poisson (0.61). Pero, ¿hasta qué punto ese modelo de Poisson es realmente bueno para esos datos?. Lo que vamos a hacer para decir algo al respecto es representar en una misma figura la distribución de frecuencias de la muestra, junto con las frecuencias que determina una distribución de Poisson (0.61) para 200 datos, que son los que tiene la muestra.

En primer lugar, vemos las frecuencias según una distribución de Poisson (0.61):

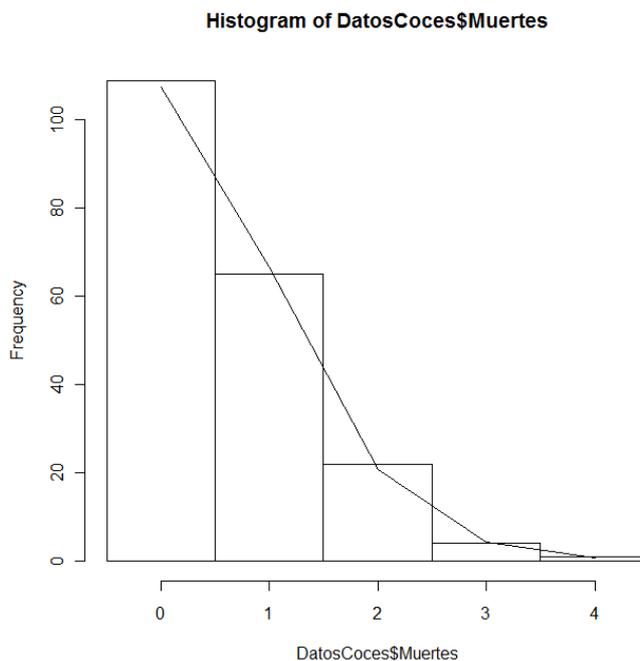
```
> 200*dpois(0:4,lambda)  
[1] 107.385678 66.782138 20.765590 4.304641 0.669254
```

Ahora, lo que queremos es un diagrama de barras que represente la distribución de frecuencias y, además, dibujar estas frecuencias que determina la distribución de Poisson ajustada a los datos

```
> hist(DatosCoces$Muertes,breaks=-0.5:4.5)
```



Añadimos las frecuencias al gráfico anterior según el modelo ajustado:  
>lines(0:4,200\*dpois(0:4,lambda))



Bortkiewicz concluyó que las muertes eran debidas al puro azar y no a ninguna causa concreta. Años después, durante los bombardeos de Londres por los cohetes alemanes V-2 en la Segunda Guerra Mundial, el mando británico dividió Londres en cuadrículas y calculó el número de impactos de los V-2 en cada una de ellas, para determinar si estaban cayendo al azar, como una variable de Poisson (como efectivamente dedujeron) o si los alemanes eran capaces de concentrar deliberadamente el fuego en los lugares más castigados

i

*Juan Pablo Somiedo\***Analista y Profesor Ciclo Superior Análisis Inteligencia UAM  
Área de Estudios Estratégicos e Inteligencia*

**BIBLIOGRAFÍA:**

- ASSAD, Arjang , GASS, Saul. (2011). Profiles in Operations Research. Pioneers and innovators. International Series in Operations Research and Management Science, vol. 147, Springer: United States.
- SHRADER, Charles R. (2006) History of Operations Research in the United States Army. Volume I: 1942-1962. Office of the Deputy Under Secretary of the Army for Operations Research, U.S. Army: Washington, D.C
- CHICARRO, Mateo (1985). Aplicaciones militares en el Seminario de Investigación Operativa, Trabajos de Estadística y de Investigación Operativa, vol 36, nº 3, pp. 89-99.
- CLAUSEWITZ, Carl Von (1999) De la guerra. Ministerio de Defensa: Madrid.
- GALILEI, Galileo (2005), Il Saggiatore, Antenore: Roma.
- JAISWAL, N.K.(1997) Military Operations Research: Quantitative Decision Making. Springer: United States.
- MANNES, Aaron (2008) The snake head Strategy: Does killing or Capturing its leaders reduce a terrorist group's activity, Journal of International Policy, vol. 9, pp. 40-49.
- MEIFREN, José F. (2006). Boletín Informativo para personal de la Armada, Cuartel General de la Armada, Jefatura Personal, nº111.
- MORSE, Philip M. y KIMBALL, George E. (2006) Methods of Operations Research. Courier Dover Publications: United States.
- NAVARRO IBÁÑEZ, Fernando. (1965). "La investigación operativa en la dirección de las operaciones militares" en Ejército: Revista ilustrada de armas y servicios, año XXVI, nº 310, pp. 3-6.
- PARRA, Francisco. (1992). *Elementos para una teoría formal del sistema social*, Editorial Complutense: Madrid.
- RIOS INSUA, David, RIOS, Jesús y BANKS, D. (2009). Adversarial Risk Analysis, Journal of the American Statistical Association, 104, 841–854.
- RIOS INSUA, David, RIOS, Jesús (2012) Adversial Risk Análisis for counterterrorism modeling, Risk Analysis, vol 32, issue 5. Disponible en la web en: [http://zenodo.org/record/6885/files/Adversarial\\_Risk\\_Analysis\\_for\\_Counterterrorism\\_Modeling.pdf](http://zenodo.org/record/6885/files/Adversarial_Risk_Analysis_for_Counterterrorism_Modeling.pdf)
- SHRADER, Charles R. (2006) History of Operations Research in the United States Army. Volume I: 1942-1962. Office of the Deputy Under Secretary of the Army for Operations Research, U.S. Army: Washington, D.C

- WAINFAN, Lynne, *Multi-perspective Strategic Decision Making. Principles, Methods and Tools*, RAND Corporation, Marzo 2010. Disponible en la web en: [http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/rgs\\_dissertations/2010/RAND\\_RGSD260.pdf](http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/rgs_dissertations/2010/RAND_RGSD260.pdf)
- WILSON, Alyson, WILSON, Gregory, OLWELL, David, (editores). (2006). *Statistical Methods in Counterterrorism. Game Theory, Modeling, Syndromic, Surveillance and Biometric Authentication*, Springer: USA.

---

\*NOTA: Las ideas contenidas en los *Documentos de Opinión* son de responsabilidad de sus autores, sin que reflejen, necesariamente, el pensamiento del IEEE o del Ministerio de Defensa.