

## Modelo de inclusión tecnológica UAV para la prevención de trabajos de alto riesgo, en industrias de la construcción basado en la metodología IVAS

Alfredo Toriz P. \*, Modesto Raygoza B., Daniel Martínez N.

*Departamento de posgrados en Ingeniería y Negocios. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, 17 Sur 901 Col. Santiago C.P. 72410 Puebla, México.*

### Resumen

La evaluación de riesgos se hace vital al momento de prevenir accidentes laborales, los métodos tradicionales de evaluación de riesgos inician normalmente con la identificación y reconocimiento de riesgos. Uno de los métodos más utilizados para evaluar riesgos laborales es el método de Investigación, Valuación, Análisis y Selección (IVAS). La presente investigación tuvo el propósito de construir y probar un modelo de inclusión tecnológica con ayuda de la herramienta UAV, la cual permitió robustecer y hacer más eficaz la tarea de identificación y reconocimiento de riesgos, al adoptarla se logrará prevenir y reducir los accidentes laborales. Es importante comentar que el modelo diseñado como inclusión tecnológica utilizó reconstrucción 3D y se implementó en la industria de la construcción, logrando resultados satisfactorios para la generación de una innovación de tipo incremental para la mejora del método de análisis de riesgos IVAS.

### Palabras Clave:

Robótica de servicio, Vehículos aéreos no tripulados (UAV), inclusión tecnológica.

### 1. Introducción

El conocimiento sobre la prevención de trabajos de alto riesgo ha evolucionado, con la finalidad de tener perfiles generales sobre los criterios y resultados obtenidos en los estudios de accidentes laborales. En varios casos, el grado de profundidad con que se han analizado, fue heterogéneo; lo que se traduce en que las causas de los accidentes, dependen del interés y en la forma en cómo se abordan los problemas (Jiménez Naruse and Alvear Galindo, 2005).

Existen retos para realizar prácticas preventivas sin enfocarse en lo económico, sino en la disminución de la frecuencia de los accidentes y en la gravedad del daño en función del bienestar del trabajador. (Solís Carcaño and Sosa Chagoyán, 2013), además de generar modelos de mayor complejidad para comprender las causas y establecer medidas correctivas.

En México, en el informe anual de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, sobre accidentes y enfermedades en el trabajo (2013) cuantifica un incremento 3% en accidentes de trabajo, 15% en incapacidades laborales, con 2.56 accidentes por cada 100 trabajadores y 6.07 incapacidades por cada 100 casos. Siendo la construcción de edificios, obras de ingeniería civil, los servicios profesionales y técnicos, los grupos de actividad con mayor incidencia de riesgos y defunciones.

Por lo anterior, la protección del trabajador frente a los riesgos

laborales, exige a la empresa el rediseño de un modelo de evaluación y deberes empresariales, así como la corrección a posteriori de situaciones de riesgo ya manifestadas.

En los múltiples modelos de evaluación de riesgos, existe posibilidad de aplicar una inclusión tecnológica con el uso de un UAV (vehículo aéreo no tripulado), los cuáles por su amplio alcance y visibilidad, facilitan los trabajos en terrenos irregulares y accidentados, sin mencionar la alternativa de bajos costos para la supervisión aérea en aspectos de identificación de riesgos respecto a otros equipos donde se requieren estructuras muy robustas (Cavalcanti, et al. 2008).

Una tecnología emergente se desarrolla mediante los robots de servicio en aplicaciones de seguridad y defensa. Tienen como función principal efectuar rondas de vigilancia y autónomas con mínima intervención el vigilante y efectuando tareas en lugares que representan peligros para el trabajador. Son un apoyo al personal y a los sistemas fijos, pues contribuyen a la reducción de riesgos laborales o de seguridad. Ésta tecnología está equipada con cámaras de día/noche, sensores, micrófono y altavoz, sistemas de detección de intrusos, foco, etc. Transmite los datos, alarmas e imágenes tomadas vía inalámbrica.

Existe una gran área dentro de la robótica de servicios (en específico los aplicados a seguridad y vigilancia), los cuales tienen también capacidad de desplazarse para situarse en su lugar de trabajo, a veces alejado al puesto de control o en un lugar de muy difícil acceso o peligroso para los humanos (Aracil, et al., 2005).

Diversas aplicaciones dentro del campo de la Robótica de intervención y de técnicas multi-robot permite realizar estudios en

\* Autor en correspondencia.

Correo electrónico: [alfredo.toriz@upaep.mx](mailto:alfredo.toriz@upaep.mx) (Alfredo Toriz P.)

URL: [upaep.mx](http://upaep.mx)

amplios espacios para aumentar la eficacia y eficiencia de la operación, por ejemplo, cuando se trata de localizar e identificar vehículos en un estacionamiento, en actividades de vigilancia, seguridad o exploración, en donde se incluyen las interacciones entre robots, robots con humanos y con el entorno (Sagues et al., 2012). En este sentido, Rebollo, Maza y Ollero (2009) proponen un método de planificación de trayectorias para múltiples UAV's basado en la modificación del perfil de velocidad de los diferentes vehículos, el cual considera elementos dinámicos no cooperativos dentro del espacio de trabajo de los robots para que estos puedan desarrollar sus tareas evitando problemas de colisión cuando aparecen obstáculos en sus trayectorias.

Otra aplicación de robots para el trabajo en vigilancia, monitorización, localización y otros más usos, es la llamada robótica ubicua, la cual integra redes de cámaras o redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Networks-WSN) para lograr una comunicación entre robots móviles y redes de sensores distribuidos, sin embargo, se han tenido dificultades en la investigación debido a la escasez de bancos de pruebas adecuados para validar y comparar métodos (Jiménez González et al., 2014).

Una de las limitaciones de usar robots de servicio para vigilancia o de usar cámaras de vigilancia, es que muchas veces se necesita más de un equipo para lograr cooperación, pero hay limitaciones de comunicación entre los equipos al momento de compartir la información que obtienen, y al instante de vigilar un perímetro tienen un rango de comunicación limitada (Acebedo et al., 2011), además que el costo de los mismo no es bajo en comparación con un UAV's.

Durante las dos últimas décadas, se ha incrementado el diseño y construcción de UAV por parte de empresas privadas de diversos sectores (Clarke, 2014), entre ellos, centros de investigación, protección civil y de prevención de riesgos, facilitando el acceso de mini UAV (mUAV) dentro de la categoría de Componentes Comerciales y de Fácil Acceso (Pineda, 2014).

En una publicación reciente de Watts, Ambrosia, y Hinkley (2012) se muestra un desarrollo cronológico de las principales aplicaciones en diferentes entornos industriales y civiles. Rosales, Scaglia, Carelli, y Jordan (2011) establecen que las principales aplicaciones son en la vigilancia del tráfico en carreteras, las operaciones de búsqueda aérea y salvamento, la recolección de información para la predicción meteorológica o detección de fuego. Carles Ambrojo, (2013) coincide, además, para el control de niveles de radiación de la central nuclear de Fukushima, la revisión de líneas de alta tensión y estado de los edificios. También para actividades en grabación aérea que permiten nuevas soluciones, costos más económicos y cero riesgos para los seres humanos (Florian et al., 2011).

Aunque los desarrollos han sido tecnológicamente eficientes, variables relacionadas con la movilidad sostenible de los UAV's en ambientes comerciales han empezado a despertar el interés de los investigadores (DeGarmo and Nelson 2004), ya que éstas determinarán la adopción de estas tecnologías. Así, Piera et al. (2014) realizan un análisis basado en simulación de sistemas de transporte aéreo y las interdependencias con el sistema financiero, el cambio climático y la creciente escasez de recursos con la finalidad de comprender el fenómeno y llevar el transporte aéreo hacia un sistema sostenible.

Partiendo de la definición de modelo conceptual, este, se caracteriza por explicar la realidad tal y como funciona, representando las operaciones internas de un sistema, no emite juicio, ni selecciona una alternativa como sucede en un modelo de

decisión (Caretta, A., 2012), mientras que una estrategia, es la determinación de los objetivos a largo plazo y la elección de las acciones y la asignación de recursos necesarios para conseguirlos. (Chandler 1990).

En este sentido y contemplando la necesidad de disminuir los accidentes desde la prevención, se plantea el diseño de un modelo de inclusión tecnológica para robustecer un método de evaluación de riesgos que permita disminuir los peligros y accidentes durante su ejecución mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados basado en la metodología de Investigación, Valuación, Análisis y Selección para el análisis de riesgos (IVAS).

Esta investigación identifica un marco estratégico para ser utilizado por las organizaciones en la gestión de sus sistemas de gestión de seguridad y la adopción de nuevas tecnologías, aportando una innovación tecnológica de tipo incremental, específicamente para la metodología IVAS.

## 2. Trabajos relacionados

El término riesgo es utilizado en diversas connotaciones, como la existencia de un daño futuro, hipotético, es decir que su acontecimiento no es fácilmente de identificar y caracterizar. Esto significa que, si ante una situación no se detecta una causa o factor de riesgo, este puede considerarse controlado, pero no eliminado ya que pueden existir otras condiciones que pueden detonarlo. Por ello, la determinación de la magnitud de un riesgo no es sencillo.

Existe amplia literatura sobre gestión de riesgos y su impacto. Jannadi y Almishari (2003) definen el riesgo como una medida de la probabilidad, la gravedad y la exposición a los peligros de una actividad. Salla y Sanna (2008) los clasifica, en tres grupos, los relacionados con la ergonomía, el trabajo y el medio ambiente. Otros estudios los han centrado con base en proyectos en la comunidad (Manelele and Muya, 2008). Ante la diversidad de riesgos no existe una metodología que logre abarcar todas las casuísticas existentes, ni de investigar las causas de los accidentes, pero si anticiparse con apoyo de la tecnología.

Pinto, Nuñez y Ribeiro (2011) agrupan algunas de las herramientas más utilizadas en los programas de evaluación de riesgos laborales mencionando: AEB, la evolución de accidentes y la función de barrera; AHP, Proceso Analítico Jerárquico; CREMA, fiabilidad cognitiva y el método de análisis de errores; EA, el análisis de la energía; AMFE, modo de fallo y análisis de efectos; FMECA, efecto del modo de fallo y análisis de la criticidad; TLC, análisis de árbol de fallas; HAZOP, peligros y estudios de operatividad; ISRS, sistema de calificación de seguridad internacional; MORT, supervisión de la gestión y el árbol de riesgos; ORA, la evaluación de riesgos laborales; PHA, análisis de riesgos preliminar; SCHAZOP, peligro de cultura de la seguridad y operatividad de estudio; ELLA, salud seguridad y medio ambiente de auditoría; TEP, secuencialmente eventos trazado cronometrado; Therp, técnica para la predicción de tasa de error humano, por mencionar algunas.

Se debe recordar que los métodos de evaluación de riesgos se clasifican en: a) métodos simplificados, que sirven para tomar una primera aproximación al riesgo y tomar acciones preventivas; y b) métodos complejos cuando los riesgos suelen ser muy graves y se centran en la máxima pérdida posible y no en la esperanza de lesiones. (Rubio Romer and Rubio Gámez, 2005) Así también, dentro de las directrices para la evaluación de riesgos en el lugar de trabajo de la Comisión Europea (1996), la misma Fundación Europea para la mejora de las condiciones de vida y trabajo (en el

documento sobre las condiciones de trabajo-prácticas del año 1996) y el propio Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT, 1997) han clasificado a los métodos como evaluación general o global de riesgos (evaluación en primera fase que establezca una distinción entre riesgos conocidos donde generalmente se utilizan métodos simplificados) y métodos de evaluación específica de riesgos (destinado a evaluar un determinado riesgo en particular como por ejemplo un riesgo a sufrir un incendio o explosión).

Los métodos (técnicas) de evaluación de riesgos deben ser aplicadas de acuerdo a las etapas de vida del proceso, en lo referente a la etapa de operación normal de un proceso los métodos más utilizados son: auditorías de seguridad, análisis histórico de accidentes, listas de control, Que pasa si...?, HAZOP, FMEA, árboles de fallas y árboles de sucesos (Fàbrega, 2009). Así mismo, Fàbrega, señala al menos cinco limitaciones de los métodos tradicionales, tales como: 1) la exhaustividad del estudio, 2) la reproducibilidad de los resultados, 3) lo inextricable de las conclusiones, 4) la importancia de la experiencia, y 5) el nivel de confianza generado por el estudio.

En Reino Unido, Billy et al. (2006) desarrollaron un modelo para garantizar la planificación y la gestión de recursos, en lugar de intentar ejecutar procedimientos por separados. Hallowell (2007) validó un método en donde coinciden los elementos del programa de seguridad, en los procesos de construcción. En Grecia, Rozenfeld et al. (2010) desarrolló el método "Análisis de Seguridad del Trabajo de Construcción" que tiene la capacidad de predecir fluctuaciones en los niveles de riesgo.

Benjaoran y Bhokha (2010) integraron el proceso de la construcción mediante el análisis de riesgo a lo largo de las fases de diseño, planificación y control. Rajendran (2006) evalúa la capacidad relativa de los elementos de programa de seguridad para mejorar la seguridad del sitio. Markowski et al. (2009) establecen que el método ORA, estima los niveles de riesgo a los individuos o compañeros (trabajadores) a través de tres pasos: identificación, evaluación y jerarquía de los riesgos potenciales.

Sin embargo, Salla Lind Sanna Nenonen, (2008), coinciden que debe garantizarse que los trabajadores tengan conocimiento de seguridad pertinentes por medio de evaluaciones de riesgos e instrucción en la práctica de trabajo seguro.

El sistema de evaluación de riesgos laborales como se observa, sigue un proceso que puede quedar resumido en el método conocido por IVAS. : Identificación de los riesgos existente a través de actividades cuyo objetivo sea tal identificación (Inspecciones y observaciones); Valoración o evaluación de riesgos utilizando para ello un método que permita clasificarlos en función de su criticidad; Actuación, toma de medidas correctoras, de acuerdo a la prioridad marcada por la evaluación, tratando de eliminar los riesgos, y si no, reducirlos y controlarlos; Seguimiento de las medidas correctoras señalando, responsable de la realización, plazo de las mismas y comprobación de su eficacia (Azcúenaga L. M., 2004).

No obstante, el reto en la administración de riesgos laborales consiste en rediseñar las herramientas para realizar mejores análisis de riesgos. Actualmente, la mayoría de los procesos de inspección son ejecutados manualmente por inspectores calificados; el proceso es subjetivo y los operadores se someten a condiciones peligrosas, inclusive con poca luminosidad. La robótica de servicio puede solucionar algunas de esas situaciones y mejorar la calidad de la inspección recolectando diferentes tipos de datos. (Montero, et. al., 2015). Knegtering y Jasman, (2009) apoyaron un modelo de enfoque al cliente que puede fomentar la

seguridad en los proyectos de construcción, estableciendo en uno de los principios el asegurar la identificación de los riesgos y su eliminación a través de "la implementación de controles tecnológicos".

## 1. Modelo de inclusión tecnológica UAV-IVAS

El diseño del modelo inició con la observación de los elementos que intervienen en la evaluación de riesgos, para determinar si el uso de un UAV durante la etapa de identificación y reconocimiento facilita el trabajo de prevención de accidentes, además de que las empresas que lo incluyan, generen ventajas tecnológicas en seguridad industrial. Mediante el método I.V.A.S. se encontraron los cuatro pasos del proceso para llevar a cabo la evaluación de riesgos, los cuales son: la identificación de riesgos, la valoración, la actuación y el seguimiento de los mismos. De estos cuatro pasos él estudió solo aportará robustez para el primer paso (ver figura 1).

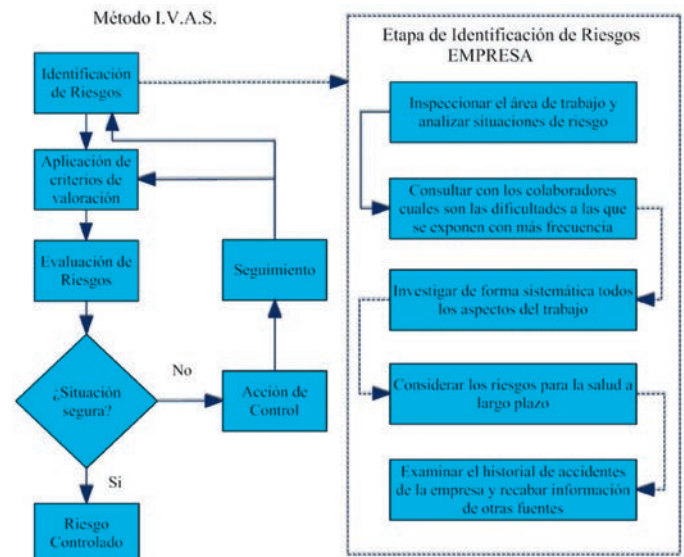


Figura 1: Método IVAS e identificación de riesgo. Fuente adaptación propia de (Azcúenaga L. M., 2004)

### 3.1 Diseño del modelo UAV

Para el diseño del modelo de inclusión tecnología UAV como primera actividad se integró un panel de expertos, quienes con ayuda del método Delphi desarrollaron su experiencia, para lo cual siguieron las cuatro fases que Astigarraga (2008) presenta para implementar dicho método: 1. Formulación del problema; 2. Elección de expertos; 3. Elaboración y lanzamiento de cuestionarios y, 4. Desarrollo práctico y explotación de resultados.

En cuanto al desarrollo de la primera fase del método Delphi, se partió de un análisis de cada uno de los pasos de la etapa de identificación de riesgos del método I.V.A.S. (ver figura 1), recordando que con éste método tradicional, los pasos que se realizan en la etapa de identificación de riesgos industriales en la empresa son: inspeccionar el área de trabajo y analizar situaciones de riesgo, consultar con los colaboradores cuales son las dificultades a las que se exponen con mayor frecuencia, investigar de forma sistemática todos los aspectos de trabajo, considerar los riesgos para la salud a largo plazo, y examinar el historial de accidentes y recabar información de otras fuentes. Se estableció

como definición del problema probar si el uso de vehículos UAV durante la etapa de identificación y reconocimiento facilita el trabajo de prevención de accidentes.

Para la fase dos del método Delphi se integró un panel de once expertos dividiéndose en dos grupos; El primero denominado panel A (asesores) formado por seis profesionales relacionados al trabajo de alto riesgo, construcción y seguridad industrial. El panel A integró a dos gerentes de firmas constructoras, un instructor de seguridad industrial y tres supervisores de seguridad industrial provenientes de las paraestatales PEMEX y la Central Termoeléctrica de Tuxpan, Veracruz.

El segundo grupo de expertos llamado panel B, fue conformado por cinco expertos en el área de Planeación Estratégica y Dirección de Tecnología con perfil académico en Ingeniería industrial, Electrónica, Química y Gestión de negocios y el ingeniero civil residente de obra.

Los roles del panel de expertos A fue el siguiente: facilitó información, brindó asesoría, disposición, compromiso y acompañamiento a las pruebas de campo diseñadas expreso para la identificación y reconocimiento en trabajos de alto riesgo empleando las herramientas de observación de campo y la entrevista, que facilitan la precisión de la investigación. El trabajo que realizaron fue durante un periodo de 6 semanas consecutivas (a partir de la segunda semana del mes de enero del 2015) para ir validando el modelo de inclusión tecnológica UAV mediante el uso del método Delphi (Bravo and Arrieta, 2005) y siguiendo las cuatro fases que Astigarraga (2008) presenta. Inicialmente partiendo del problema definido como: probar si el uso de UAV durante la etapa de identificación y reconocimiento facilita el trabajo de prevención de accidentes.

Durante las seis sesiones semanales (sesiones de una hora) de aplicación del instrumento (seis cuestionarios, uno cada semana), los expertos hicieron uso de computadoras interconectadas en red mediante el sistema Skype al mismo tiempo, para evitar sesgos, acompañados siempre con un moderador del panel B, consiguiendo que el procesamiento de la información en tiempo casi instantáneo, además de obtener los resultados en tiempo y forma para garantizar una iteración y retroalimentación controlada.

Por otro lado, en cuanto a los roles del panel de expertos B, éste fue responsable del estudio de campo, uso y adquisición de la inclusión tecnológica UAV, diseñó las coordenadas de la ruta de inspección y seguimiento para el UAV y estableció puntos críticos para realizar la captura de imágenes y video, así como todo lo relacionado con la operación del UAV y la reconstrucción 3D del ambiente.

Para el desarrollo de la fase tres del método Delphi (Elaboración y lanzamiento de cuestionarios), el instrumento (cuestionarios) que utilizaron los expertos contiene cuatro iteraciones, a través de diecisiete ítems, con preguntas claras, precisas, cuantificables y cualitativas que permitieran responderse de manera independiente (Astigarraga, 2008). Los primeros dos ítems referían al nombre y la fecha de la evaluación, los cuatro siguientes a la variable “claridad”, que asegurará la ausencia de dudas sobre el contexto y validación del cuestionario, las seis siguientes evaluaron la “identificación de riesgo”, en donde las preguntas planteadas estaban referidas al cuestionamiento siguiente: Si usted es responsable de la seguridad en su industria se ha preguntado alguna vez ¿Ayudaran los UAV's en la prevención de riesgos industriales para el logro de cero accidentes?, (ya que las preguntas tenían la finalidad de encontrar utilidad en el uso del UAV como herramienta de inclusión

tecnológica). Los últimos cinco ítems asintieron la opinión de los expertos con relación a la variable “inclusión tecnológica, para validar la propuesta de innovación incremental para la identificación de riesgos. Las respuestas cualitativas se trasladaron a cuantitativas mediante la escala de liker y con una valoración máxima de 10.

Para el desarrollo práctico y explotación de resultados (fase cuatro del método Delphi), se procedió inicialmente a realizar el diseño del modelo (de tipo conceptual) de inclusión tecnológica UAV para la etapa de identificación de riesgos del método I.V.A.S (ver figura 2). El modelo diseñado contiene tres elementos los cuales se pueden observar en las tres columnas que se muestran en el recuadro rojo (figura 2).

El primer elemento “A) EMPRESA” representa a los miembros de la empresa (en especial el residente de obra o supervisor de seguridad, debido a la experiencia que posee, su capacidad técnica y el conocimiento de su equipo humano). Este elemento considera dos actividades: 1) Definir el área a ser inspeccionada por el residente de obra y, 2) Informe final al residente de obra (última actividad del modelo). En cuanto a la primera actividad encargada de definir el área sujeta a observación, se estableció como unidades experimentales a cada uno de los trabajos de alto riesgo realizados en una actividad u operación de obra civil, por lo que de una lista de trabajos que se tienen en una obra (plan o programa de trabajo de obra) se seleccionó con ayuda del experto residente de obra como unidad experimental un trabajo individual llamado: “colocación de través de acero en estructura de un techo de una cancha de usos múltiples”.

El Segundo elemento del modelo propuesto es “B) PANEL DE EXPERTOS” (figura 2, columna 2). Este elemento contiene tres actividades: 1) Diseñar la ruta de inspección y seguimiento para el UAV, 2) Establecer puntos críticos para la captura de imágenes y videos, y 3) reproducción de imágenes para el análisis de zonas de riesgo.

En cuanto al diseño de la ruta de inspección y seguimiento para el UAV, debido a la característica inaccesible de la zona de inspección, se determinaron dos rutas con seguimiento. Enseguida se establecieron los puntos críticos los cuales fueron las anclas donde se colocaría una estructura con la finalidad de observar que estuvieran en las posiciones correctas para el montaje.

El tercer elemento “C) INCLUSION TECNOLOGICA UAV” (ver figura 2, columna C) contiene tres actividades:

1) Proporcionar al operador UAV la ruta de seguimiento. En ésta actividad se entregó al operador las coordenadas de las rutas de inspección, así como los puntos críticos y las consideraciones para la operación del UAV.

2) Vuelo de reconocimiento, captura de imágenes, video y reconstrucción 3D. En ésta actividad el UAV realizó vuelos en donde logro capturar distintas imágenes y videos con el fin de identificar riesgos. se realizaron pruebas de campo. Durante las pruebas de campo se utilizó el Parrot AR Drone 2.0 como herramienta principal de inclusión la tecnológica, perteneciente a los micro y mini UAV, su peso oscila entre 100 gramos y 30 kilos y vuelan a baja altitud (por debajo de 300 metros) (Félez, 2013). El Parrot AR 2.0 funciona propulsado por cuatro motores eléctricos en configuración cuadricoptero; cuenta con un microprocesador, una serie de sensores, dos cámaras con una resolución de 1280 x 720 pixeles, un conector Wi-Fi integrado, que le permite vincularse a dispositivos móviles personales, mientras se reciben las imágenes y datos de telemetría en tiempo real.

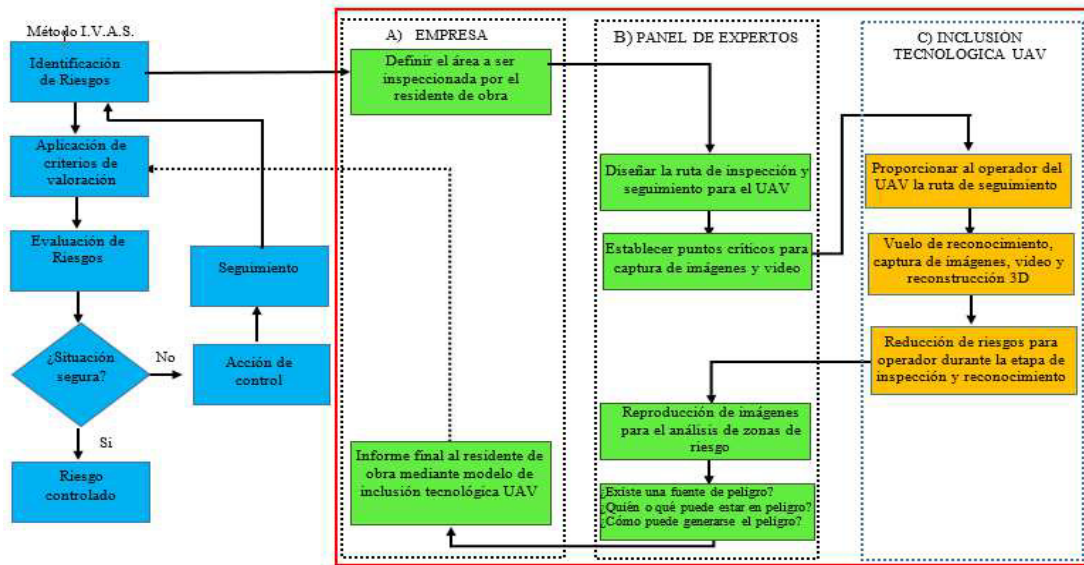


Figura 2: Modelo de Inclusión Tecnológica UAV-IVAS. Fuente: Elaboración propia

Para hacer la reconstrucción 3D del ambiente basándose en la ruta planificada, fue necesario en primer lugar conocer información interna relevante del vehículo para realizar la tarea, tal como: altura, velocidad, giros, estabilidad e inercia del vehículo; mismos que han sido ampliamente estudiados y analizados en el trabajo presentado por Bristeau et al. (2011). Así mismo, la extracción de información externa a través de las cámaras de abordaje tiene la misma importancia, ya que es a partir de la adquisición y tratamiento de esta información es posible la construcción del ambiente 3D.

De lo anterior, el algoritmo desarrollado en este trabajo se basa inicialmente en la predicción de la posición del UAV utilizando su información odométrica. Esta primera suposición es de vital importancia, ya que uno de los elementos principales para la obtención del modelo 3D del ambiente es ubicación espacial de la cámara.

A continuación, las imágenes captadas por las cámaras de abordaje, son utilizadas a través del método de SLAM monocular presentada por Civera et al. (2008) para realizar una localización más precisa del vehículo en el ambiente. Este algoritmo está basado en la extracción de puntos invariantes de interés dentro de la imagen, ubicados en el espacio  $R^3$ , los cuales son utilizados por el filtro de Kalman Extendido (herramienta ampliamente difundida para resolver el problema de SLAM), para la localización del UAV y la construcción simultánea del mapa.

Así, una vez que la imagen del ambiente es obtenida, el método propuesto por Bay et al. (2008) de aceleración de características robustas (SURF) es utilizado para recopilar puntos característicos. Esto se logra apoyándose en imágenes integrales para su convolución. En este sentido, el método SURF hace uso de un detector basado en la matriz Hessiana para la determinación de puntos de interés dentro de la imagen y la escala de los mismos. Entonces, dado un punto  $P = (x, y)$  en la imagen, la matriz Hessiana  $\eta = (P, \sigma)$  en  $P$  con escala  $\sigma$  se define como:

$$\eta(P, \sigma) = \begin{bmatrix} \tau_{xx}(P, \sigma) & \tau_{xy}(P, \sigma) \\ \tau_{xy}(P, \sigma) & \tau_{yy}(P, \sigma) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $\tau_{xx}(P, \sigma)$  es la convolución de la derivada de segundo orden de la Gaussiana  $\frac{\partial^2}{\partial^2 x^2} g(\sigma)$  con la imagen  $I$  en el punto  $P$ , y de forma similar para  $\tau_{xy}(P, \sigma)$  y  $\tau_{yy}(P, \sigma)$ . El determinante de la Hessiana indica la escala del punto de interés, y se calcula a través de aproximaciones a las derivadas de segundo orden de las gaussianas ( $\psi_{xx}$ ,  $\psi_{xy}$ ,  $\psi_{yy}$ ) con la siguiente fórmula:

$$Det(\eta_{aprox}) = \psi_{xx}\psi_{yy} - (0.9\psi_{xy})^2 \quad (2)$$

Con la intención de obtener puntos de interés que fueran identificables en imágenes consecutivas bajo diferentes condiciones de visión. En el presente trabajo, el descriptor.

Una vez obtenida la escala, el siguiente paso del método SURF es aplicar un descriptor; esto, con la finalidad de obtener puntos de interés identificables en imágenes consecutivas bajo diferentes condiciones de visión, por lo que el descriptor tiene que ser distintivo y al mismo tiempo, robusto al ruido, errores de detección, y deformaciones geométricas y fotométricas. Para este fin, fue necesario realizar el cálculo de la orientación del punto de interés, misma que está basada en la suma del “Haar wavelet” para las direcciones  $(x, y)$  en una región circular de radio  $6s$ , donde  $s$  es la escala del punto de interés. Una vez calculadas las direcciones para todos los vecinos, se estima la orientación dominante calculando la suma de todos los resultados dentro de una ventana que cubre un ángulo de  $\frac{\pi}{3}$ . La finalidad de este paso es la de construir una región cuadrada centrada alrededor del punto de interés con la intención de describir la distribución de la intensidad del contenido. El resultado de la aplicación del método SURF puede observarse en la figura 3.

Aunque el método SURF proporciona un método eficiente para la identificación de puntos característicos en una imagen, el resultado de su aplicación se limita al espacio  $R^2$ . Así, las imágenes obtenidas con la identificación de puntos característicos

fueron tratadas utilizando el método de representación de profundidad inversa para el problema de SLAM monocular propuesta por Civera et al. (2008), donde, a partir de una serie de imágenes de secuencia fija de un ambiente obtenidas desde una cámara en movimiento, es posible obtener una descripción tridimensional de los puntos característicos contenidos en ellas y utilizarlos para obtener un modelo tridimensional de la escena.



Figura 3: Resultado de la aplicación del método SURF en la imagen captada por el UAV

Así, para cada punto clave contenido en las imágenes, el método de la profundidad inversa eliminará la incertidumbre de la profundidad de cada uno de ellos, llevando su información del espacio R2 al espacio R3. Entonces, cada punto  $i$  en el espacio tridimensional, es definido por un vector de estado de 6 dimensiones:

$$y_i = (x_i \ y_i \ z_i \ \theta_i \ \phi_i \ p_i)^T \quad (3)$$

El cual codifica el rayo desde la posición de la cámara desde la cual la característica fue observada por primera vez, siendo  $(x_i, y_i, z_i)$  el centro óptico de la cámara, y  $(\theta_i, \phi_i)$  el azimut y la elevación codificados en el sistema de referencia global de la escena. La profundidad de la característica a lo largo del rayo  $d_i$  es obtenido a través de su inversa  $p_i = 1/d_i$  (figura 4).

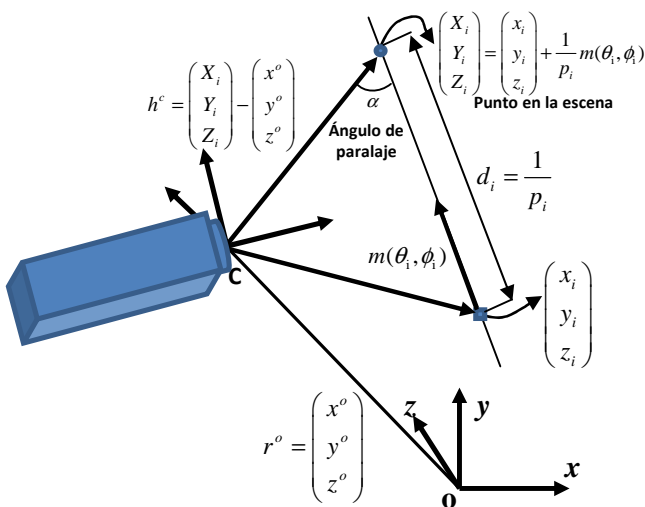


Figura 4: Parametrización de características Fuente: Elaboración propia

El vector obtenido, es utilizado entonces para modelar un punto 3D en términos de coordenadas euclidianas XYZ como sigue:

$$x_i = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} + \frac{1}{p_i} m(\theta_i, \phi_i) \quad (4)$$

Donde  $m = (\cos \phi_i \text{sen} \theta_i - \text{sen} \phi_i \cos \theta_i \cos \phi_i \cos \theta_i)$  representa un vector direccional unitario.

Una vez obtenidos los puntos característicos de la escena en el espacio  $R^3$ , el siguiente paso es utilizarlos en combinación con el filtro de Kalman extendido para la reconstrucción 3D del ambiente.

De lo anterior, el primer paso para que el EKF pueda ejecutarse es la creación de la matriz de covarianza  $P$  que está formada por las matrices de covarianza entre la cámara y las características del entorno, y el vector de estado  $\lambda$  que contendrá la posición de la cámara y la estimación de los puntos característicos de la escena.

La matriz  $P$  tiene la forma:

$$P = \begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy_1} & P_{xy_2} & \dots \\ P_{y_1x} & P_{y_1y_1} & P_{y_1y_2} & \dots \\ P_{y_2x} & P_{y_2y_1} & P_{y_2y_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (5)$$

Y el vector de estado  $\lambda$  tiene la forma:

$$\lambda = (x_v^T \ y_1^T \ y_2^T \ y_3^T \ \dots \ y_n^T)^T \quad (6)$$

Donde  $y_i$  es el vector de estado de tres dimensiones de la característica  $i$ :

$$y_i = (X_i \ Y_i \ Z_i)^T \quad (7)$$

y donde  $x_v$  es el vector de estado de la cámara, formado por un vector de posición  $r^o$ , un cuaternión de orientación  $q^{co}$  que representa la orientación C de la cámara del robot con respecto al sistema de referencia global O, un vector de velocidad lineal  $v^o$  relativo al sistema de referencia global, y un vector de velocidad angular  $\omega^C$  relativo al sistema de referencia de la cámara del UAV, este último obtenido del propio sistema odométrico.

Con lo anterior, el algoritmo del EKF, mostrado en la figura 5, es ejecutado para cada imagen capturada por el UAV como sigue:

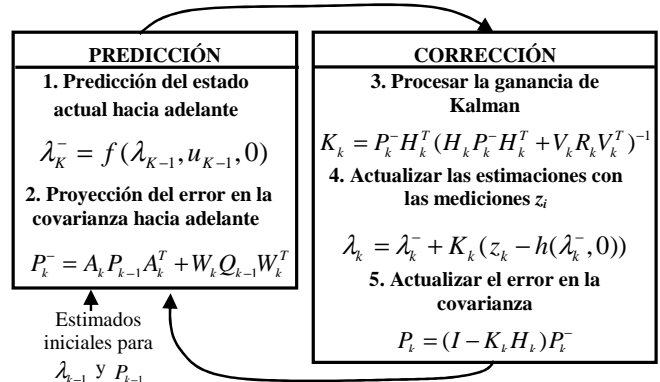


Figura 5: Algoritmo del EKF. Fuente: Elaboración propia.

Los pasos del Algoritmo del EKF son:

1. Etapa de predicción. El filtro actualiza la posición y la velocidad del UAV a partir de los datos odométricos reportados por éste.
2. Asociación de datos. Consiste en alinear las características que están siendo observadas en el paso  $k$ , con aquellas que han sido almacenadas en el mapa. Es necesario hacer hincapié en la importancia de la correcta asociación entre las características para una construcción consistente del mapa, ya que cualquier asociación falsa podría invalidar el proceso entero. Así, en este paso, se utilizó el método de asociación de dato de compatibilidad conjunta (JCBB) propuesta por Neira et al. (2001). Este algoritmo realiza una prueba para determinar la compatibilidad individual entre una observación ( $z_i$ ) y una característica obtenida del mapa, y un criterio de selección que permita decidir cuáles son las mejores asociaciones de entre el conjunto de asociaciones compatibles.
3. Etapa de corrección, en la cual, conocida la diferencia entre la medición y su estimado, se corrigen las posiciones de las características observadas y del UAV, reduciendo la incertidumbre entre estas (Figura 6).

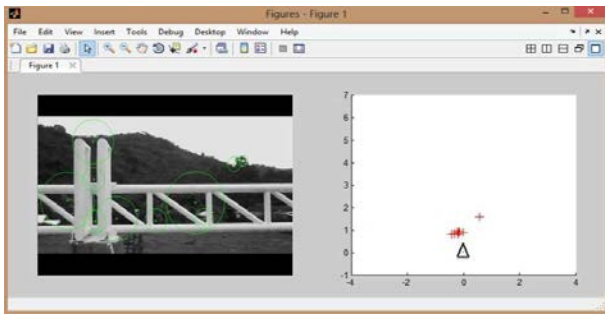


Figura 6: Evolución del algoritmo EKF con puntos SURF. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con la culminación del EKF la actualización del mapa de ambiente debe realizarse agregando las características observadas localizadas que no formaban parte de él y que servirán en cada paso del proceso para el proceso de localización.

Considerando que la finalidad de la creación del mapa 3D tiene como objetivo en este trabajo presentar una visión completa que pueda ser analizada por un agente externo, una funcionalidad extra es añadida a la reconstrucción, en la cual, las posiciones localizadas del UAV, serán utilizadas para obtener una nube de puntos que representa el ambiente 3D. Con este fin, cada imagen obtenida es tratada para obtener los bordes de los objetos presentes en ellos, y mediante dos imágenes consecutivas, estos bordes alineados son posicionados en el mapa utilizando el concepto de visión estero, en la cual, la posición de las cámaras en instantes de tiempo diferentes es bien conocida, y a partir de una triangulación de puntos, estos pueden ser ubicados en el espacio  $R^3$  para obtener el mapa detallado (Figura 7).

Después de haber realizado todo el diseño de reconstrucción 3D, el trabajo de recoger muestras mediante vuelo de reconocimiento por el UAV, inicio en la segunda semana del mes de enero del año 2015 y fue efectuado durante 3 semanas, considerando solo días de lunes a sábado y descartando días no propios para la prueba (lluvias, vientos fuertes-superiores a 15k/h., y neblinas extremas). Se establecieron tres horarios

(7:00,11:00 y 15:00 horas respectivamente) para la toma de imágenes y videos.

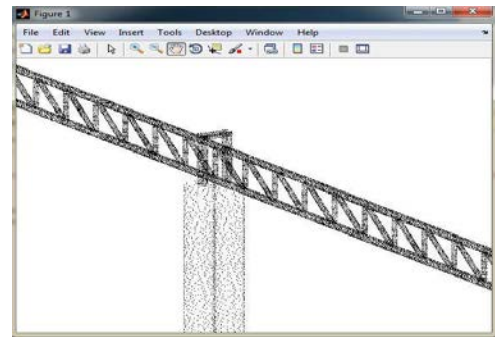


Figura 7: Nube de puntos de la escena. Fuente: Elaboración propia

Se definió como hipótesis establecer la relación (efecto) en la detección de riesgos en una obra civil cuando se inspeccionan trabajos peligrosos con ayuda de un UAV (que tomará fotografías o imágenes instantáneas que permita observar sucesos inmediatos o de elevada inercia temporal y realizará reconstrucción 3D). Para la definición de la hipótesis se consideró que: a) el proyecto de obra y de trabajo se realizó de acuerdo a normas existentes, b) se tiene un procedimiento para efectuar el trabajo y, c) se tiene una lista de riesgos asociados que se estiman por el residente de obra.

En cuanto a la tercera actividad (reducción de riesgo para operador-figura 2) del elemento “C) INCLUSION TECNOLÓGICA UAV”, durante la etapa de inspección y reconocimiento, ésta se realizó tomando en cuenta la circular del año 2010 que emitió la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) a través de la Dirección General de Aeronáutica Civil de México (DGAC), misma que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) a fin de preservar la seguridad del público y también, por supuesto, de los operadores de UAV. Es importante comentar que dicha circular fue actualizada por la circular CO AV-23/10 R2 (DGAC, 2015).

Una vez logrado lo anterior, se procede a reproducir las imágenes y videos y con ayuda de los expertos del panel B se realiza el análisis de zonas de riesgo y la identificación de riesgos. Para tal actividad se hicieron las preguntas ¿existe una fuente de peligro?, ¿Quién o qué puede estar en peligro?, ¿Cómo puede generarse el peligro?. Todo quedó registrado en una bitácora de identificación de riesgos (ver tabla1).

Por último, el modelo propuesto establece la realización del informe final de riesgos identificados con ayuda de la Inclusión UAV. Dicho informe es observado por el residente de obra para realizar acciones posteriores y continuar con la metodología I.V.A.S (ver figura 1, aplicación de criterios de valoración y evaluación de riesgos).

#### 4. Resultados

La implementación y validación del modelo propuesto se realizó desarrollando las actividades siguientes:

a) El panel de expertos B realizó inicialmente un experimento obteniendo una lista de los 25 riesgos posibles (Fàbrega, 2009) y estimados éstos por experiencia del residente de obra. Como segundo paso procedió a definir como muestra el número de mediciones (riesgos identificados) de la unidad experimental (operación de obra civil determinada), para lo cual

antes de mandar a vuelo al UAV se le preguntaba al residente de obra los tipos y riesgos asociados y se registraba en una bitácora (ver tabla 1), posteriormente con ayuda del operador del UAV se tomaban las imágenes y videos. En la primera ruta se capturaron videos con una vista frontal, lateral derecha, lateral izquierda, trasera y superior para obtener imágenes de 360° y asegurar un montaje con reducción de riesgos. En la segunda ruta, se realizaron inspecciones aéreas para asegurar un descargue y anclaje correcto. Captando imágenes superiores y laterales para monitorear su verticalidad.



Figura 8: Parrot AR Drone 2.0 utilizado en las pruebas.

b) En lo referente a la realización de la reconstrucción y reconocimiento 3D, se obtuvo una imagen del ambiente de trabajo basada en una nueve de puntos mismas fue utilizada para realizar un análisis más precisa (ver figura 9).

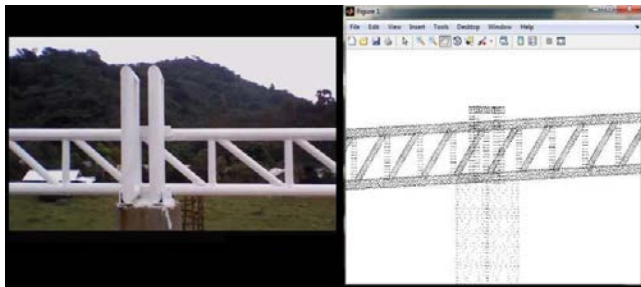


Figura 9: Reconstrucción 3D del entorno a partir del video obtenido por el UAV

c) Posteriormente el grupo de expertos B reprodujo las imágenes y videos, identico el número de riesgos detectados y procedió a registrarlos en la bitácora (ver tabla 1).

Tabla 1: Mediciones de riesgos identificados Residente Vs UAV. Fuente: Elaboración propia

Día	No. de Riesgos identificados por residente	No. de Riesgos identificados por UAV
1	13	20
2	10	17
3	15	20
4	13	15
5	13	19
6	13	17
7	15	18
8	12	16
9	12	18
10	14	19
11	12	18
12	11	19
	153	216

d) El primer análisis estadístico consistió en observar (con ayuda del muestreo aleatorio simple) el comportamiento de la variable Y (25 riesgos posibles de accidente) al identificarlos con dos métodos distintos: 1) mediante la experiencia y observación directa del residente de obra y, 2) mediante las imágenes y videos captadas por el UAV. (ver figura 10). Con ayuda del UAV se lograron identificar 216 riesgos, comparado estos contra los 153 riesgos detectados mediante la experiencia del residente de obra, se logró identificar un 41.17% más riesgos durante el período de observación (figura 10).

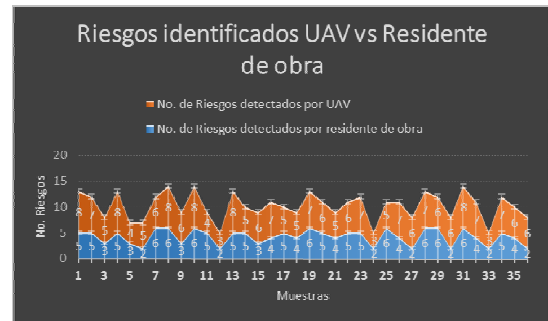


Figura 10: Comparación de riesgos identificados residente vs UAV. Fuente: Elaboración propia

Enseguida se realizó una prueba de hipótesis para establecer que es posible identificar un mayor número de riesgos con ayuda del UAV en comparación con el método tradicional que utiliza el residente de obra. Se utilizó el software SPSS versión 9 para Windows, primeramente, observando que los datos seguían una distribución normal se realizó una prueba común con muestras grandes (Mendenhall, Scheaffer, and Wackerly, 1986). Con ayuda de los datos de la tabla 1 se calcularon los parámetros de la media y la desviación estándar. Como población conocida se tomaron los datos tomados del residente de obra y se calculó la media ( $\mu=3.648649$ ) y desviación estándar ( $\sigma=1.441725$ ) y se estimó de los datos obtenidos por el UAV la media maestra ( $\bar{Y}= 5.573166$ ) y como desviación estándar ( $\hat{s}=1.454058$ ). El nivel de significancia se estableció de 0.05 con valor de  $Z= 1.96$  (ver tabla 2).

Tabla 2: Resultados estadísticos de prueba de hipótesis. Fuente: Elaboración propia.

PRUEBA DE HIPOTESIS	
Ho	$\leq 3.648649$ (Aprox. 4 riesgos)
H1	$> 3.648649$ (Mayor a 4 riesgos)
Criterio	$Ho \neq si Z > 1.96$
Resultado del cálculo	$Z = \frac{\bar{Y} - \mu}{\hat{s} / \sqrt{n}} = 7.94139$

Como se puede observar en los datos de la tabla 2, el valor calculado para Z es mayor que el valor de Z en tablas, por lo que se rechaza la hipótesis nula establecida para la prueba efectuada y se concluye que los riesgos identificados mediante UAV son mayores que los que se identifican con el método tradicional, además, para el estudio específico se concluye que en promedio se identifican aproximadamente 6 riesgos con ayuda de UAV en comparación a los 4 riesgos promedio mediante el método tradicional.

Por otro lado, y de manera paralela al experimento, se validó el presente modelo a través de los resultados proporcionados por los cuestionarios que respondieron los expertos del panel A, inicialmente para la variable “identificación de riesgo” y en segundo término para la variable “inclusión tecnológica”. En la



tabla 3, se muestra el resultado de las items, con los principales resultados estadísticos que se pueden emplear (Astigarraga, 2008) y bajo consenso de los expertos y obtenidos mediante técnicas estadísticas.

Tabla 3: Resultados estadísticos de aplicación del método Delphi. Fuente: Elaboración propia.

Estadísticos	VARIABLE		
	"Claridad"	"Identificación de riesgo"	"Inclusión tecnológica"
Media	10	9.12820513	9.71428571
Mediana	10	10	10
Desviación estándar	1	1.8425	0.71411296
Moda	10	10	10
Máximo	10	10	10
Mínimo	10	7	8

Los valores de las medidas de tendencia central y de dispersión (media, mediana, moda y desviación estándar) contribuyen a justificar que los resultados del consenso de expertos para validar el modelo de inclusión tecnología UAV como estable y aceptable para dicho propósito.

Con la aplicación de las pruebas de hipótesis y durante el desarrollo de la técnica Delphi los expertos (panel A y B) observan resultados positivos y favorables de beneficio durante la fase de identificación y reconocimiento para la metodología IVAS, pues se incrementa el valor frente al riesgo ya que el modelo incluye un proceso lógico-deductivo más robusto y estructurado al abarcar más puntos de observación e información (imágenes, videos y reconstrucción 3D), y con ello se fortalece la propuesta de incluir el modelo de inclusión tecnológica UVA para la prevención de trabajos de alto riesgo, basado en la metodología IVAS.

Los procedimientos o métodos de evaluación de riesgos citados en el presente documento tienen como valor agregado para la reducción de riesgos y costos para las organizaciones el diseño de un modelo de inclusión tecnológica empleando UAV, el cual proporciona mayor versatilidad y amplia utilización durante las etapas del ciclo de vida del proceso, ya que se reduce las limitaciones de los métodos tradicionales (Fàbrega, 2009), tales como: con la captura de imágenes, videos y reconocimiento 3D con ayuda del UAV es posible hacer un estudio más exhaustivo y ello reducirá la subjetividad que poseen los estudios tradicionales, apoyara fuertemente al analista, ampliará mayormente su experiencia y se mejorará el nivel de confianza al proporcionar más información no subjetiva de los riesgos identificados.(Fàbrega, 2009).

Con la metodología presentada para desarrollar el modelo propuesto, bajo la combinación de actividades como la aportación de conocimientos, experiencia e información de las tres fuentes (panel de expertos, los empleados de la empresa y el instrumento de inclusión tecnológica UAV), se facilitó el análisis de la situación de trabajo e identificó los riesgos existentes. Demostrando que la adicción de una innovación incremental como lo es el modelo de inclusión tecnológica UAV a una metodología de evaluación de riesgos contribuye a robustecer la identificación de riesgos y disminuir futuros accidentes de trabajo.

## 5. Conclusiones

De acuerdo con Pinto et al (2011), la evaluación de riesgos laborales (ORA) en sitios del lugar de trabajo es el primer y

fundamental paso, para lograr los niveles de seguridad adecuados, en particular para apoyar la toma de decisiones en los programas de seguridad. Como se observa, las empresas que utilicen estrategias de inclusión tecnológica fortalecerán la prevención de accidentes y la disminución de costos que estos originan, además de que podrán generar una ventaja competitiva al incluir drones en sus procesos.

Los métodos (técnicas) de evaluación de riesgos deben ser aplicadas de acuerdo a las etapas de vida del proceso, la elección de una u otra se deberá ver reflejada tomando en cuenta sus ventajas, desventajas y estimación (muchas veces económica) de la duración del estudio (Fàbrega, 2009). La evaluación básica del lugar de trabajo requiere conocimientos o experiencias esenciales; para la realización de evaluaciones exhaustivas será siempre necesario la colaboración de los especialistas. Por lo anterior, fue el motivo del usar el método Delphi para validar el modelo, primeramente, por querer comparar dos métodos, además de favorecer la constante revisión del objetivo de la investigación (Briceño & Romero, 2012) y en segundo lugar la importancia de la inclusión tecnológica propuesta en el presente modelo.

La experiencia demuestra que, en una gestión de riesgo adecuada, basada siempre en una identificación correcta, el número de accidentes tiende a disminuir paralelamente a la magnitud de sus consecuencias. Como trabajo futuro se pretende llevar el presente estudio utilizando UAV's que están prontos a salir al mercado, los cuales poseen mejores características tales como el que incluirán 14 megapixels, que permitirá tomar imágenes con mayor estabilidad y a 180°, para poder desarrollar experimentos que inicialmente permitan vincular la información (imágenes) proporcionada durante la etapa de reconocimiento e identificación de riesgos con un software específico, el cual permita traducir y evaluar dichas imágenes para poder cuantificar y clasificarlas de acuerdo al tipo de riesgo e importancia detectado, y con ello generar una información que contribuya a la toma de decisiones en términos de conocer si se tiene riesgos controlados, o se necesitaran acciones de refuerzo y control para la prevención de accidentes, de esta manera se podrá aportar más solidez al proceso de gestión de riesgos industriales.

## English Summary

**UAV technology inclusion model for preventing high-risk jobs in construction industries based on the IVAS methodology.**

## Abstract

Risk assessment is vital when prevent accidents, the traditional methods of risk assessment typically starts with the identification and recognition of risks. One of the most used methods to assess occupational hazards is the method of Research, Valuation, Analysis and Selection (I.V.A.S.). This research was intended to build and test a model of technological inclusion using the UAV tool, which allowed to strengthen and make more effective the task of identification and recognition of risks will be achieved by adopting prevent and reduce accidents. It is important to note that the model designed as a technology including 3D reconstruction used and implemented in the construction industry, achieving satisfactory results for the generation of a type incremental innovation to improve the risk analysis method (IVAS).

**Keywords:**

Service robotics, Unmanned Aerial Vehicles (UAV), Technological inclusion.

**Referencias**

- Acebedo, J. J., Arrue, B. C., Maza, I., Ollero, A., 2011. Distribución óptima de múltiples robots en vigilancia de perímetros. *Actas ROBOT 2011*, 228-232.
- Aracil, R., Saltarén, S., Ferre, M., Yime, E., Álvarez, C., García, V., 2005. Design, modelling and hydrodynamic simulation of a robot of variable geometry for actuations on maritime disasters. *Symposium on Marine Accidental Oil Spills*.
- Astigarraga, E., 2008. El método Delphi. Universidad Deusto. San Sebastián.
- Azcúñaga, L. M., 2004. Guía para la implementación de un sistema de prevención de riesgos laborales (3a. ed.). Fundación CONFEMETAL. Madrid.
- Benjaoran, V., Bhokha, S., 2010. Un integrados de gestión de seguridad con gestión de la construcción mediante el modelo 4D CAD. *Ciencia de seguridad* 48, 395-403.
- Billy, H., Cameron, A., Roy D., 2006. La exploración de la integración de la salud y la seguridad con la construcción de la planificación previa. *Ingeniería, Construcción y Gestión de Arquitectura*. Vol. 13, pp 438 - 450.
- Bravo, M. d., Arrieta, J. J., 2005. El método Delphi. Su implementación en una estrategia didáctica para la enseñanza de las demostraciones geométricas. *Revista Iberoamericana de Educación*, 1-10.
- Briceño, M. M., Romero, R. T., 2012. Aplicación del Método Delphi para la validación de los instrumentos de evaluación del libro electrónico multimedia. *ANALES de la Universidad Metropolitana*, 37-67.
- Bristeau, P.-J., Callou, F., Vissiere, D., 2011. The Navigation and Control Technology inside the AR.Drone micro UAV. *IFAC*, 1477–1484. DOI:10.3182/20110828-6-IT-1002.02327
- Carles, J., 2013. Los drones 'se alistan' al servicio civil. *Técnica Industrial* 303, 18-19.
- Cavalcanti, A., Shirinzadeh, B., Freitas, J., Hogg, T., 2008. Nanorobot architecture for medical target Identification. *Nanotechnology* 19, 1 - 15. DOI: 10.1088/0957-4484/19/01/015103
- Civera, J., Davison, A., Montiel, J., 2008. Inverse Depth Parameterization for Monocular SLAM. *IEEE Transactions on Robotics* 24, 932 - 945. DOI:10.1109/TR0.2008.2003276
- Clarke, R., 2014. Understanding the Drone Epidemic. *Computer Law & Security Report* 3, 230–246. DOI: 10.1016/j.clsr.2014.03.002
- DGAC. 2015. Secretaría de Comunicaciones y Transportes-Dirección General de Aeronáutica Civil.
- Díaz, J. M., 2007. Técnicas de prevención de riesgos laborales: seguridad e higiene del trabajo, 9na Edición. TEBAR, Madrid.
- Fábrega, J. C., 2009. Análisis del riesgo en instalaciones industriales. Universidad Politécnica de Catalunya, Catalunya.
- Félez, E. A., 2013. Drones: una nueva era de la vigilancia y de la privacidad. *Ciberseguridad e infraestructuras críticas*, 48-57.
- Florian, S., Bürkle, A., Kollmann, M., Schönbein, R., 2011. Instantaneous Autonomous Aerial Reconnaissance for Civil Applications. *The Sixth International Conference on Systems*, 72-76.
- Hallowell, M.R., Gambatese, J., 2007. A Formal Model for Construction Safety Risk Management. The construction and building research conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors, 1-15.
- INSHT, 1997. Evaluación de riesgos laborales. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Jannadi, O.A., Almishari, S., 2003. Evaluación de Riesgos en la construcción. *Diario de Ingeniería y Gestión* 129, Construcción 492-500.
- Jiménez, A., Martínez, J. R., De San Bernabé, A., Núñez, G., Ollero, A 2014. Un Banco de Pruebas Remoto para Experimentación en Robótica Ubicua. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 68-79. DOI:10.1016/j.riai.2013.09.007
- Jiménez, V. A., Flores, J. A., Rocha, L. A., 2011. Aplicación del modelo "Antecedente-Comportamiento-Consecuencia" en la construcción de lumbreras y túneles. *Revista Ingeniería de Construcción*, 171-186. DOI: 10.4067/S0718-50732011000200003
- Jiménez, N. Y., Alvear, M. G., 2005. Accidentes de trabajo: Un perfil general. *Revista Facultad de Medicina de la UNAM* 48, 139-146.
- Knegtering, B., Jasman, H., 2009. Safety of the process industries in the 21st century: A changing need of process safety management for a changing industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 162 - 168. DOI:10.1016/j.jlp.2008.11.005
- Kangari, R., Riggs, L.S., 1989. Construction risk assessment by linguistics. *IEEE Transactions on Engineering Management* 36, 126 - 131. DOI:10.1109/17.18829
- Manelele, I., Muya, M., 2008. Risk identification on community-based construction projects in Zambia. *Journal of Engineering Design and Technology* 6, 145-161. DOI: 10.1108/17260530810891289
- Markowski, A., Mannan, B. A., Bigoszezka, A., 2009. Fuzzy logic for process safety analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22, 695-702. DOI: 10.1016/j.jlp.2008.11.011
- Mendenhall, W., Scheaffer, R. L., Wackerly, D. D., 1986. *Estadística Matemática con Aplicaciones*. Iberoamericana, México, D.F.
- Montero, R., Victores, J., Martínez, S., Jardón, A., Balaguer, C., 2015. Past, present and future of robotic tunnel inspection. *Automation in Construction*, 99-112. DOI:10.1016/j.autcon.2015.02.003
- De Silva, N., Wimalaratne, P., 2012. OSH management framework for workers at construction sites in Sri Lanka. *Engineering Construction & Architectural Management* 19, 369 -392. DOI: 10.1108/09699981211237094
- DeGarmo, M., Nelson, G., 2004. Prospective Unmanned Aerial Vehicle Operations in the Future National Airspace System. *AIAA 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*. DOI: 10.2514/6.2004-6243
- Neira, J., Tardós, J., 2001. Data Association in Stochastic Mapping using the Joint Compatibility Test. *IEEE Transaction on Robotics and Automation* 16, 890-897. DOI:10.1109/70.976019
- Piera, M., Ramos, J., Moreno, R., Narciso, M., 2014. Causal simulation models for facing third millennium air transport sustainability. *Simulation* 90, 162-170. DOI: 10.1177/0037549712469247
- Rajendran, S., 2006. Sustainable Construction Safety and Health Rating System. PhD Dissertation, Oregon State University, Corvallis, OR.
- Rozenfeld, O., Sacks, R., Rosenfeld, Y., Baum, H., 2010. Construction Job Safety Analysis. *Safety Science* 48, 491-498. DOI: 10.1016/j.ssci.2009.12.017
- Rubio, J. C., 2004. Métodos de evaluación de riesgos laborales. Ediciones Diaz de Santos, S.A, Madrid.
- Pineda, U., 2014. Plataforma Avanzada de Comunicaciones para Redes de mini-UAV (drones) Aplicadas a la Prevención, Control y Reacción Rápida en Situaciones de Emergencia. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), México.
- Pinto, A., Nunes, I., Ribeiro, R., 2011. Occupational Risk Assessment in Construction Industry - Overview and Reflection. *Safety Science*, 616-624. DOI:10.1016/j.ssci.2011.01.003
- Rebollo, J., Maza, I., Ollero, A., 2009. Planificación de Trayectorias Libres de Colisión para Múltiples UAVs usando el Perfil de Velocidad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 6, 51-60. DOI: 10.1016/S1697-7912(09)70108-6
- Rosales, C., Scaglia, G., Carelli, R., Jordan, M., 2011. Seguimiento de trayectoria de un mini-helicóptero de cuatro rotores basado en métodos numéricos. *XIV Reunión de Trabajo Procesamiento de la Información y Control*, 495 - 500.
- Rubio Romero, J. C., Rubio Gámez, M., 2005. Manual de coordinación de seguridad y salud en las obras de construcción. Díaz de Santos, Madrid.
- Sagues, C., Mosteo, A. R., Tardioli, D., Murillo, A. C., Villarroel, J. L., Montano, L., 2012. Sistema multi-robot para localización e identificación de vehículos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 69-80. DOI:10.1016/j.riai.2011.11.012
- Salla, L., Sanna, N., 2008. Occupational risks in industrial maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 14, 194 - 204. DOI: 10.1108/13552510810877683
- Solís Carcaño, R. G., Sosa Chagoyán, A. R., 2013. Gestión de riesgos de seguridad y salud en trabajos de construcción. *Revista Educación en Ingeniería* 8, 161-170.
- Watts, A., Ambrosia, V., Hinkley, E., 2012. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing*, 1671-1692. DOI:10.3390/rs4061671