



INTEGRACIÓN DE HERRAMIENTAS BASADAS EN FALLA POR FATIGA PARA LA EVALUACIÓN ERGONÓMICA Y PRODUCTIVA EN LA INDUSTRIA SALMONERA CHILENA: DESARROLLO DE SOFTWARE Y CASOS DE ESTUDIO

**INTEGRATION OF FATIGUE-BASED TOOLS FOR ERGONOMIC AND PRODUCTION
EVALUATION IN THE CHILEAN SALMON INDUSTRY: SOFTWARE
DEVELOPMENT AND CASE STUDIES**

Mauricio Henríquez-Schott*

Michael Zabala**

Víctor Mercado-Gallardo ***

Gabriel Vásquez-Castillo****

Sean Gallagher*****

Iván Nail-Ulloa*****

Resumen: El presente artículo tiene como objetivo presentar el desarrollo y uso aplicado de una herramienta computacional basada en la teoría de falla por fatiga para la evaluación del riesgo ergonómico en tareas laborales. Se desarrolló una plataforma denominada ErgoTools, que integra las herramientas LiFFT, DUET y TST en un entorno unificado que permite estimar la carga acumulada en la región lumbar, extremidades superiores distales y hombros, respectivamente. El software, de código abierto y disponible en español, permite ingresar variables clave de las tareas, visualizar los resultados mediante un modelo anatómico 3D y comparar escenarios de exposición entre diferentes trabajadores o tareas. Para ilustrar su aplicación, se presentan tres casos extraídos de una planta procesadora de salmón en el sur de Chile, donde se analizaron tareas de corte de cabeza, despinado de filetes y traslado de cajas. Los resultados evidencian diferencias en la carga acumulativa y riesgo de lesión entre trabajadores que realizan tareas similares, asociadas a factores como experiencia, ubicación en la línea de producción, o características antropométricas. Además, se identificaron oportunidades de mejora vinculadas a la calidad del producto y la eficiencia del proceso. Se concluye que el uso de herramientas

*Instituto de Gestión e Industria, Universidad Austral de Chile, Puerto Montt, Chile. Correo electrónico: mauriciohenriquez@uach.cl, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7740-1617>. Autor de correspondencia.

**Department of Mechanical Engineering, Auburn University. Auburn, Estados Unidos. Correo electrónico: zabalme@auburn.edu, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0353-1723>

***Departamento de Ingeniería Química y Bioprocessos, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. Correo electrónico: victor.mercado@uc.cl, Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-8900-8841>

**** Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. Correo electrónico: gabriel.vasquez@uach.cl , Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-4389-4800>

*****Department of Industrial and Systems Engineering, Auburn University. Auburn, Estados Unidos. Correo electrónico: seangallagher@auburn.edu , Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6228-3590>

*****Department of Mechanical Engineering, Auburn University. Auburn, Estados Unidos. Correo electrónico: ivan.nail@auburn.edu , Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-1778-1133>

como ErgoTools permite incorporar nuevas dimensiones al análisis ergonómico, facilitando la toma de decisiones informadas en prevención de lesiones y gestión operativa.

Palabras clave: Trastornos musculoesqueléticos, Evaluación del riesgo, Industria salmonera, LiFFT, DUET, Shoulder Tool.

Abstract: This article aims to present the development and applied use of a computational tool based on fatigue failure theory for the ergonomic risk assessment of occupational tasks. A platform called ErgoTools was developed, integrating the LiFFT, DUET, and Shoulder Tool (TST) into a unified environment capable of estimating cumulative tissue loading in the lumbar spine, distal upper extremities, and shoulders, respectively. The open-source software, available in Spanish, allows users to input key task parameters, visualize results through a 3D anatomical model, and compare exposure scenarios across different workers or job tasks. To illustrate its application, three case studies from a salmon processing facility in southern Chile are presented, covering head-cutting, fillet deboning, and box-handling operations. The results reveal notable differences in cumulative loading and injury risk among workers performing similar tasks, linked to factors such as experience, workstation location, and anthropometric characteristics. Additionally, opportunities for improvement related to product quality and process efficiency were identified. In conclusion, the use of tools such as ErgoTools introduces new dimensions to ergonomic analysis, supporting informed decision-making in injury prevention and operational management.

Keywords: Musculoskeletal disorders, Risk assessment, Salmon industry, LiFFT, DUET, Shoulder Tool.

Recepción: 17.06.2025 / Revisión: 22.08.2025 / Aceptación: 27.08.2025

Introducción

Los trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo (TME) se encuentran entre las causas más comunes de lesiones laborales y pérdida de productividad (Bureau of Labor Statistics, 2020). Una revisión sistemática de la literatura identificó que, en la industria acuícola, los TME son las enfermedades ocupacionales más comunes, con una prevalencia reportada que varía entre el 21% y el 63%, evidenciando la alta carga de riesgo físico a la que están expuestos los trabajadores, en particular en tareas repetitivas y físicamente exigentes, como las desarrolladas en plantas procesadoras de salmón (Ngajilo & Jeebhay, 2019).

Esta problemática también se refleja en el contexto nacional. Un estudio realizado en distintos sectores productivos de Chile reportó una alta prevalencia de síntomas musculoesqueléticos, alcanzando un 69,74% en la muestra evaluada mediante el Cuestionario Nórdico para vigilancia de TME (Leonidas et al., 2019). Los sectores de acuicultura, agricultura e industria fueron identificados como aquellos con mayor presencia de factores de riesgo físicos, principalmente movimientos repetitivos y tiempos de recuperación limitados, los cuales se asociaron significativamente con la sintomatología musculoesquelética.

En particular, la industria acuícola chilena, y especialmente las plantas procesadoras de salmón ubicadas en la zona sur del país, representa un entorno laboral con condiciones de riesgo ergonómico relevantes. Los trabajadores en estas instalaciones están expuestos a

factores como movimientos repetitivos, posturas forzadas y manipulación manual de cargas, lo que incrementa considerablemente la probabilidad de desarrollar TME (Lorca Manquemilla & Pinto Retamal, 2015). Estos trastornos no solo afectan la salud y calidad de vida de los trabajadores, sino que también generan importantes costos organizacionales derivados del ausentismo, las licencias médicas y la disminución de la productividad (Briggs et al., 2018).

Evidencia más específica sobre esta problemática ha sido documentada en estudios aplicados directamente a la industria salmonera chilena. En una investigación enfocada en trabajadores del proceso de despinado, se reportó que el 80% de los participantes manifestó síntomas musculoesqueléticos en la mano y muñeca derecha, seguidos por molestias en el hombro (60%) y en el brazo/codo (más del 50%), según los resultados del Cuestionario Nórdico (Ilardi, 2012). Además, se encontró una relación estadísticamente significativa entre el riesgo de TME y los niveles de productividad ($p < 0,05$). La relación sugiere que la productividad de las líneas de proceso para los trabajadores estudiados se ve afectada, disminuyendo, al tener presente factores de riesgo ergonómicos.

Diversos estudios han demostrado de forma consistente que la exposición acumulada al estrés repetitivo sobre los tejidos musculoesqueléticos es un factor determinante en el desarrollo de TME (Balogh et al., 2019; Callaghan et al., 2001; Jäger et al., 2000; Kumar, 1990; Nail-Ulloa et al., 2025; Norman et al., 1998). En consecuencia, medir con precisión la exposición acumulada a factores de riesgo físicos, como esfuerzos intensos y movimientos repetitivos, resulta esencial para comprender y mitigar dichos riesgos. Gallagher y Schall (2017), así como Gallagher y Barbe (2022), destacan que el proceso de falla por fatiga del material es un factor clave en el desarrollo de TME, subrayando la importancia de evaluar la exposición acumulada a lo largo del tiempo.

En esta línea, se han desarrollado y validado diversas herramientas de evaluación ergonómica basadas en la teoría de falla por fatiga, incluyendo aquellas dirigidas a la región lumbar “LiFFT” (*Lifting Fatigue Failure Tool / Herramienta de Falla por Fatiga en Tareas de Levantamiento*) (Gallagher et al., 2017; Zelik et al., 2022), extremidades superiores distales “DUET” (*Distal Upper Extremity Tool / Herramienta para Extremidades Superiores Distales*) (Gallagher et al., 2018) y hombros “TST” (*The Shoulder Tool / Herramienta para el Hombro*) (Bani Hani et al., 2021). Estas herramientas permiten estimar la carga acumulada diaria o “dosis diaria” a partir de datos mínimos como el peso de la carga, la distancia al cuerpo y la frecuencia de repeticiones.

Estas herramientas, además de estar fundamentadas en principios biomecánicos sólidos, se distinguen por su simplicidad operativa y su bajo requerimiento de datos, lo que ha favorecido su aplicación en diversos sectores productivos a nivel internacional. Sin embargo, hasta donde tienen conocimiento los autores, no se han registrado casos documentados de su uso en la industria chilena. Un posible obstáculo para su adopción local ha sido la disponibilidad exclusiva de estas herramientas en idioma inglés, lo que ha sido una limitante para su implementación por parte de profesionales y técnicos del ámbito ergonómico nacional, así como la falta de una solución integrada que permita evaluar la exposición acumulada en múltiples regiones del cuerpo, tareas laborales y perfiles de

trabajadores.

Con el objetivo de facilitar la aplicación práctica y la adopción sistemática de herramientas de evaluación ergonómica basadas en la teoría de falla por fatiga en la acuicultura nacional, y en la industria en general, se desarrolló ErgoTools, una plataforma informática que integra en un entorno unificado las herramientas LiFFT, DUET y TST. Este software permite realizar evaluaciones independientes por operador y visualizar de forma integrada las regiones anatómicas afectadas por la exposición acumulada a factores de riesgo físicos, como esfuerzos repetitivos y manipulaciones manuales de carga. ErgoTools incorpora funcionalidades que posibilitan la comparación entre distintos perfiles de trabajadores, tareas y escenarios laborales, aportando un soporte analítico y visual para la toma de decisiones en ergonomía preventiva. Además, su capacidad para simular y contrastar escenarios e intervenciones, contribuye al diseño de estrategias fundamentadas en evidencia para la reducción del riesgo de trastornos musculoesqueléticos. Al tratarse de una solución de código abierto, ErgoTools ofrece un amplio potencial de expansión y adaptación futura, favoreciendo su evolución funcional y su aplicación transversal en diversos contextos industriales.

La industria nacional podría beneficiarse significativamente de una plataforma que permita la evaluación integrada de riesgos musculoesqueléticos mediante múltiples herramientas validadas. En este contexto, el objetivo del presente estudio es doble: por una parte, desarrollar una plataforma computacional que unifique las herramientas LiFFT, DUET y TST en un entorno de análisis común; y por otra, presentar casos de uso aplicados, basados en una experiencia industrial real en una planta procesadora de salmón.

Materiales y métodos

Herramientas basadas en falla por fatiga para la evaluación de exposición acumulada

LiFFT se enfoca en tareas que implican levantamiento manual. A los usuarios se les solicita ingresar variables como la carga del objeto levantado, la distancia de alcance horizontal y la frecuencia de repeticiones. Basado en la teoría de falla por fatiga, esta herramienta calcula un índice de daño acumulativo diario para la región lumbar de la columna vertebral, reflejando el estrés mecánico acumulado y el correspondiente riesgo de lesión debido a levantamientos repetitivos.

DUET está orientada a la evaluación de tareas que involucran las extremidades superiores distales, como agarrar, pellizcar o manipular herramientas con las manos. Los parámetros de entrada incluyen estimación de nivel de esfuerzo acorde a la escala OMNI-RES (escala graduada de 0 a 10, donde 0 corresponde a esfuerzo mínimo y 10 corresponde a esfuerzo máximo), y a las repeticiones realizadas. DUET calcula entonces una dosis de exposición acumulada que estima la probabilidad de daño musculoesquelético en regiones como la muñeca, la mano y el antebrazo.

ST evalúa tareas que implican el uso de los brazos superiores y los hombros. Requiere

datos relacionados con el ángulo de elevación del brazo, la fuerza aplicada y la repetición de la tarea. Esta herramienta produce un índice de carga acumulada en los hombros que cuantifica el riesgo de fatiga tisular y lesiones por sobreuso en el complejo del hombro.

Desarrollo de Software ErgoTools.

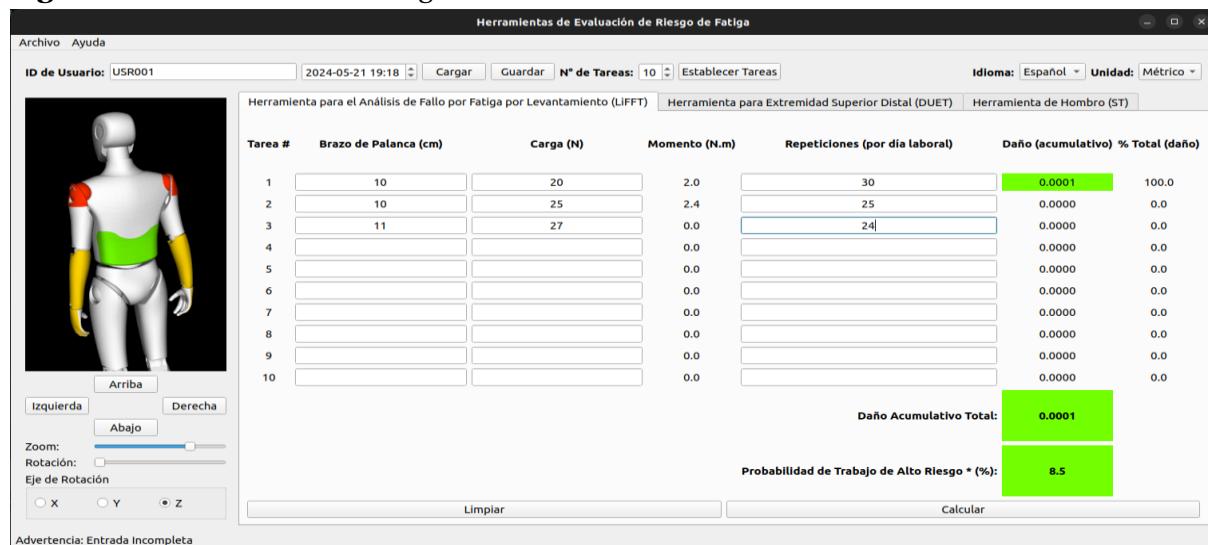
El software fue estructurado en torno a una interfaz central denominada como “ErgoTools”, la cual actúa como el espacio de trabajo principal para llevar a cabo evaluaciones ergonómicas y asociar sistemáticamente a cada trabajador con su contexto operativo. Esta interfaz está diseñada para apoyar tanto la cuantificación del riesgo ergonómico como la gestión estructurada de datos, conformando la base para los pasos posteriores de visualización y análisis.

Dentro de la Ventana de Evaluación de Herramientas, los usuarios pueden realizar evaluaciones utilizando tres herramientas ergonómicas integradas en el sistema: LiFFT, DUET y ST. Cada herramienta cuenta con una sección dedicada para el ingreso de datos, que guía al usuario en el proceso de introducción de variables específicas de la tarea, asegurando así un flujo de trabajo coherente y con mínimas posibilidades de error.

Una característica clave del software es la integración de los resultados de riesgo ergonómico con un modelo humano o “avatar” en 3D, habilitada mediante la biblioteca Visualization Toolkit (VTK). Al completar las evaluaciones en cualquiera de las herramientas, los resultados —expresados como porcentajes de daño acumulado— se representan como regiones codificadas por colores en el avatar 3D. Por ejemplo, el daño en la región lumbar evaluado por LiFFT se visualiza en tonos que van del rojo al verde, correspondientes a niveles altos y bajos de daño, respectivamente. De forma similar, el daño asociado a DUET se muestra en las extremidades superiores distales, y los resultados de ST se representan en los hombros.

Esta visualización ofrece una representación intuitiva e inmediata de los riesgos ergonómicos a los que están expuestos los trabajadores individuales, lo que permite a analistas y supervisores identificar rápidamente las áreas de mayor riesgo. Al proporcionar un mapeo fisiológico de la carga ergonómica, el sistema mejora la toma de decisiones relacionada con el rediseño de tareas, el ajuste de estaciones de trabajo y la planificación de rotaciones de personal.

Figura 1. Versión actual de la ErgoTools.



Elaboración propia

En la Figura 1 se puede observar la interfaz principal del software en su módulo correspondiente a la herramienta LiFFT. La interfaz permite ingresar múltiples tareas, especificando para cada una el brazo de palanca, la carga en newtons, el momento generado, y la cantidad de repeticiones por jornada laboral. A la derecha, se calcula el daño acumulativo asociado a cada tarea y el porcentaje que representa sobre el total. En la parte inferior se muestran los resultados consolidados, incluyendo el daño acumulativo total y la probabilidad estimada de estar expuesto a un trabajo de alto riesgo. A la izquierda, se presenta un modelo anatómico en 3D (avatar) con codificación de colores que representa las regiones corporales afectadas según los resultados, integrando visualmente la información para facilitar la interpretación ergonómica. El software permite almacenar cada evaluación en una base de datos interna, así como exportar los datos a archivos CSV para su análisis o procesamiento posterior.

El software fue desarrollado utilizando Python versión 3.10 como lenguaje de programación principal, aprovechando su robustez y amplia disponibilidad de bibliotecas. Para la construcción de las interfaces gráficas de usuario se empleó PyQt5, lo que permitió diseñar una experiencia interactiva y flexible orientada al análisis ergonómico. La gestión de datos subyacente fue manejada mediante SQLite, una solución adecuada para volúmenes bajos a medianos de datos y que destaca por su portabilidad y facilidad de integración en aplicaciones de todo tipo. La arquitectura de la aplicación es multiplataforma, compatible con sistemas operativos Windows, Linux y macOS, lo que facilita su adopción en diversos entornos técnicos. Además, la herramienta permite ser utilizada tanto en idioma inglés como en español, y ofrece compatibilidad con unidades del sistema métrico e imperial, lo que favorece su aplicación en contextos internacionales. Al tratarse de un software de código abierto (OpenSource), su desarrollo, adaptación y extensión futura pueden ser realizados libremente por la comunidad, promoviendo la colaboración y la mejora continua de la herramienta.

Casos aplicados en la industria acuícola

Los casos presentados en este manuscrito forman parte de una submuestra del estudio titulado “*Evaluando la Conexión entre Carga Acumulativa en Tejidos Musculoesqueléticos y su Efecto en la Productividad de Empresas del Rubro Salmonero*” (52-Ines 23-IAPM-05). En el marco de esta investigación, se encuestó y evaluó a más de 100 trabajadores de una planta procesadora de salmón, recabando información sobre síntomas de lesiones en hombros, espalda baja y extremidades superiores utilizando el cuestionario nórdico para vigilancia de TME.

La participación de los trabajadores en el estudio se llevó a cabo entre los meses de abril y junio de 2024. Previamente, se les informó sobre los objetivos y procedimientos de la investigación, y aquellos interesados en participar se acercaron voluntariamente al equipo investigador en una sala de reuniones destinada exclusivamente para este fin, sin la presencia de supervisores de unidad, a fin de resguardar la confidencialidad y evitar sesgos de autoridad.

Una vez entregada la información pertinente, los trabajadores firmaron un consentimiento informado y posteriormente fueron encuestados, evaluados antropométricamente y registrados en su puesto de trabajo mediante observaciones y grabaciones en video.

Se realizaron mediciones antropométricas detalladas, incluyendo altura, masa corporal y dimensiones específicas del cuerpo (altura de hombro, codos, cadera, rodilla, tobillo, alcance de brazos). Además, se utilizó un dinamómetro hidráulico de mano para determinar la fuerza máxima de prensión en ambas manos. También se recolectaron datos sobre variables personales relevantes, como horas de sueño, niveles de actividad física, estrés psicosocial, y consumo de tabaco y alcohol, entre otros. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado aprobado por la Dirección de Investigación de la Universidad Austral de Chile.

Posteriormente, el equipo de investigación acompañó a los trabajadores en sus estaciones de trabajo para registrar en video sus tareas y realizar mediciones destinadas al análisis biomecánico. Se dio especial atención a aquellos puestos con reportes de problemas de calidad, identificados por la empresa, en los que se observó una posible relación entre el riesgo de TME, productividad y la calidad del producto.

El criterio de inclusión principal fue pertenecer a la planta procesadora en estudio y encontrarse desempeñando labores regulares durante el periodo de recolección de datos. No se establecieron criterios de exclusión, ya que se buscó permitir la participación de todos los trabajadores que se encontraban en funciones. Asimismo, se informó expresamente que la participación era voluntaria y que cada trabajador podía retirarse en cualquier momento sin consecuencias. Ningún participante decidió abandonar el estudio.

Los casos presentados en las siguientes páginas ilustran el uso de las herramientas integradas en ErgoTools, y cómo su aplicación permite incorporar nuevas dimensiones al análisis ergonómico tradicional, incluyendo no solo el riesgo físico, sino también aspectos clave como la productividad y la calidad en los procesos operacionales.

Los casos seleccionados correspondieron a escenarios representativos dentro de la industria del salmón y fueron escogidos por su relevancia en el flujo productivo, así como por la factibilidad de ser analizados mediante las herramientas desarrolladas en esta investigación.

Resultados y discusión

Caso 1. Operación de “Corte de Cabeza”, diferencias en calidad de producto

En la Tabla 1 se pueden observar los datos sociodemográficos de los participantes del estudio.

El primer caso corresponde a trabajadores del área de recepción de materia prima, específicamente en la estación de corte de cabeza. En esta tarea, cuatro operarios reciben salmones eviscerados, a los cuales se les remueve la cabeza —que se utiliza como materia prima para harina de pescado— y luego se deposita el cuerpo del salmón en una cinta transportadora para continuar con el proceso productivo (Figura 2).

Figura 2. Secuencia del proceso de Corte de Cabeza



Elaboración propia

De izquierda a derecha se aprecia en la figura 2: (1) el trabajador traslada un salmón eviscerado al área de corte; (2) ejecución del corte de cabeza; (3) descarte de la cabeza; y (4) colocación del salmón descabezado en la cinta transportadora, iniciando nuevamente el ciclo.

Se evaluó a dos trabajadores (T1 y T2) que procesaban un promedio de 10 piezas por minuto, acumulando aproximadamente 864 repeticiones diarias. Ambos evaluaron su nivel de esfuerzo utilizando la escala OMNI-RES, incorporada en la herramienta DUET. También se midió la fuerza máxima de prensión manual mediante dinamometría, y se recabó información sobre la presencia de síntomas de lesión en las extremidades superiores. Los resultados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de análisis para T1 y T2.

	Trabajador 1 (T1)	Trabajador 2 (T2)
Piezas/Minuto	10	10
Esfuerzos Diarios	864	864
Escala OMNI-RES (0-10)	2	5
DUET Score (% prob)	16.6	36.9
Fuerza Registrada (kg)	52	45
Lesión Extremidad Superior	No	Si

Elaboración Propia

Las cabezas descartadas por ambos trabajadores se muestran en la Figura 3. Se observa una diferencia importante en la cantidad de carne residual: la cabeza a la izquierda (círculo verde, T1) presenta un corte más limpio, con menor pérdida de carne útil, en comparación con la cabeza a la derecha (círculo rojo, T2), que muestra mayor remanente de músculo.

A pesar de que ambos trabajadores operan a igual ritmo, T1 reporta un esfuerzo percibido menor y presenta un riesgo de lesión significativamente más bajo según DUET (16.6% vs. 36.9%). Además, mientras T1 no reporta síntomas de lesión en extremidades superiores, T2 sí declaró haber sufrido molestias durante el último año.

Figura 3. Cabezas de salmón obtenidas tras el proceso de corte de cabeza. A la izquierda (círculo verde), ejemplo de T1; a la derecha (círculo rojo), ejemplo de T2.

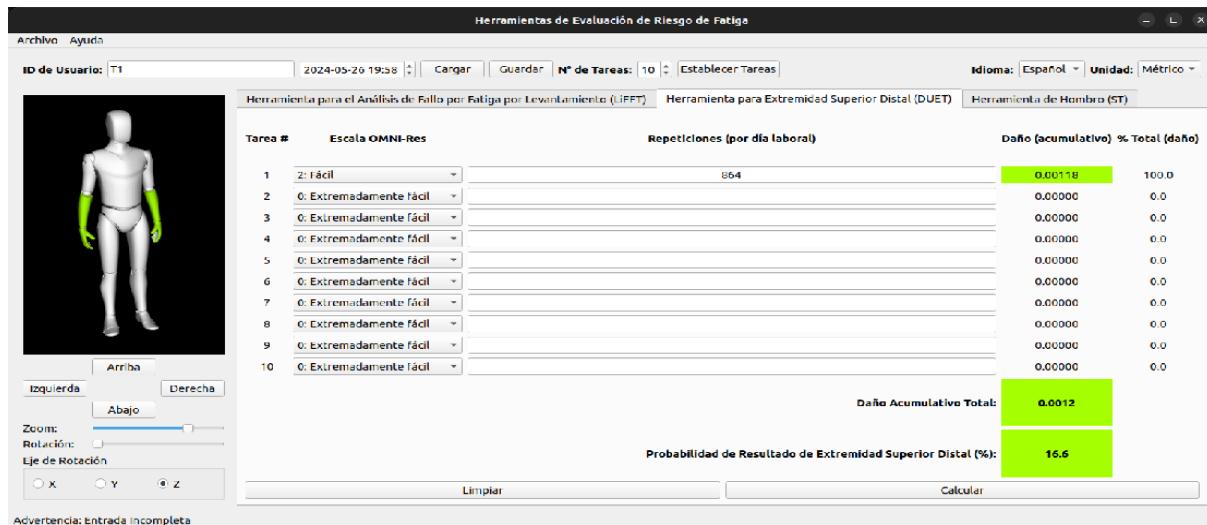


Elaboración propia

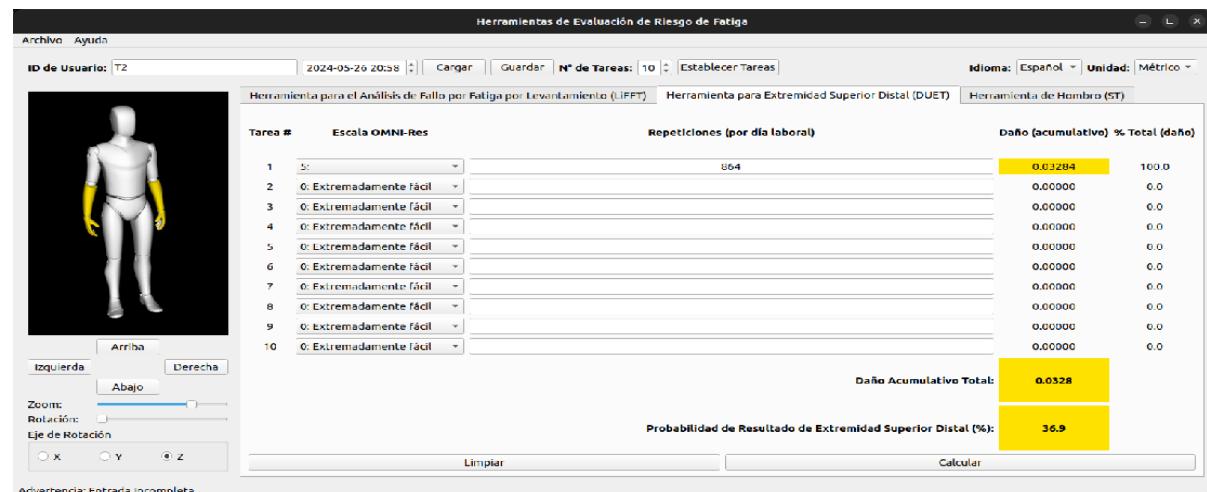
Este caso ejemplifica cómo el uso de herramientas como DUET puede agregar valor al análisis ergonómico, no solo al estimar el riesgo de trastornos musculoesqueléticos, sino también al identificar posibles impactos sobre la calidad del producto. En este caso, la menor percepción de esfuerzo de T1 está asociada a una técnica de corte más eficiente, que evita desperdicio de biomasa y reduce la carga física. Esta diferencia puede atribuirse en parte a la experiencia laboral: T1 llevaba más de seis años desempeñando esta tarea, mientras que T2 tenía menos de un año en el puesto.

A partir de estos resultados, se sugiere que la experiencia y técnica observadas en T1 podrían ser utilizadas como base para el diseño de planes de entrenamiento específicos para esta tarea. La estandarización de buenas prácticas, centradas en técnicas eficientes y de menor demanda física, podría contribuir tanto a la reducción del riesgo de lesión entre los trabajadores como a la mejora en la calidad del producto y la eficiencia operativa de la planta. En la Figura 4 y 5 se ilustran los análisis usando DUET para T1 y T2.

Figura 4. ErgoTools y DUET para T1.



Elaboración propia



Elaboración propia

Caso 2. Despinado de filetes de salmón.

El segundo caso corresponde al área de despinado, donde entre 10 y 20 trabajadoras —todas mujeres en este proceso— se disponen en dos filas enfrentadas para remover manualmente las espinas remanentes de los filetes de salmón, luego de que estos han pasado por una despinadora automática. Los filetes llegan a la estación a través de cintas transportadoras, donde cada trabajadora los acerca a su puesto, retira las espinas utilizando una pinza (Figura 6, (1)), y posteriormente devuelve el filete a la cinta para continuar con el proceso productivo.

Figura 6: De izquierda a derecha: (1) Herramienta utilizada en el proceso de despinado; (2) Trabajadora 1 (D1); (3) Trabajadora 2 (D2); (4) Trabajadora 3 (D3).



Elaboración propia

En este caso se evaluó a tres trabajadoras (D1, D2 y D3) que realizan la misma tarea con las mismas herramientas. La principal diferencia entre ellas radica en su ubicación en la línea de producción. Todas procesaron un número similar de filetes al día (460 en promedio), pero debido a su posición en la línea —con D3 al inicio y D1/D2 en posiciones finales opuestas— la cantidad de repeticiones diarias varió considerablemente, siendo D3 la más expuesta con más del triple de repeticiones respecto a las otras dos.

Se utilizó nuevamente la escala OMNI-RES para evaluar el esfuerzo percibido, y se midió la fuerza de prensión con dinamometría. Los resultados se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de análisis para D1, D2 y D3.

	Trabajador 1 (D1)	Trabajador 2 (D2)	Trabajador 3 (D3)
Espinillas por filete (μ)	4	3	16
Filetes al día (μ)	460	460	460
Repeticiones al día	1840	1380	7360
Escala OMNI-RES (0-10)	1	4	5
DUET Score (% prob)	15.1	32.3	54.0
Fuerza Registrada (kg)	28	32	25
Lesión Extremidad Superior	No	Si	Si

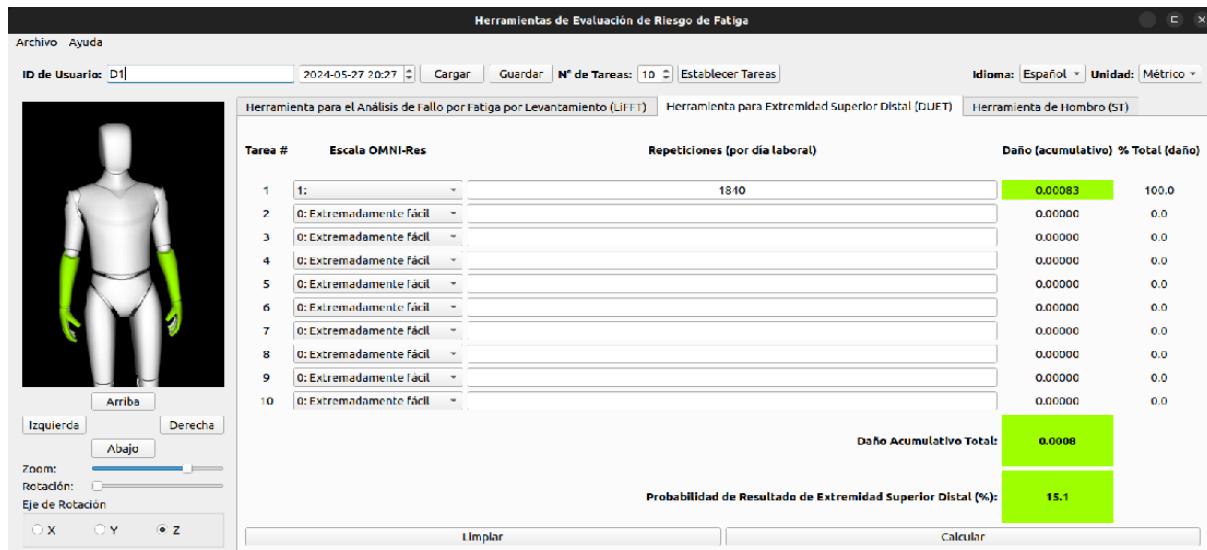
Elaboración propia

Las estimaciones de probabilidad de lesión fueron considerablemente más altas para D3, debido a la elevada cantidad de repeticiones y a un mayor nivel de esfuerzo percibido (OMNI-RES = 5). Le sigue D2, quien, a pesar de realizar menos repeticiones, reportó un esfuerzo percibido relativamente alto (OMNI-RES = 4). En contraste, D1 presentó tanto el menor nivel de esfuerzo (OMNI-RES = 1) como la menor probabilidad estimada de lesión. Además, fue la única del grupo que no reportó síntomas de lesión en las extremidades superiores.

Este caso permite visualizar cómo personas que ejecutan una misma tarea pueden experimentar cargas físicas muy distintas, dependiendo de variables como la ubicación en la línea de producción o su respuesta individual a la tarea. Considerar este tipo de diferencias podría permitir la optimización de estrategias de rotación de personal basadas en el nivel de

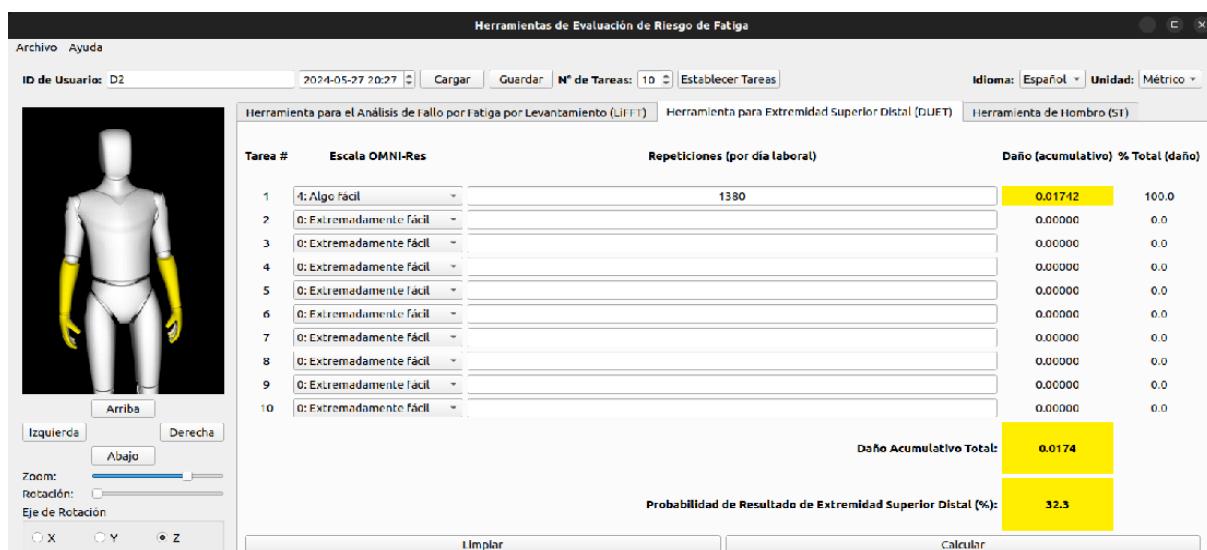
esfuerzo y número de repeticiones diarias, contribuyendo tanto al bienestar del trabajador como al rendimiento del proceso.

Figura 7. ErgoTools y DUET para D1.



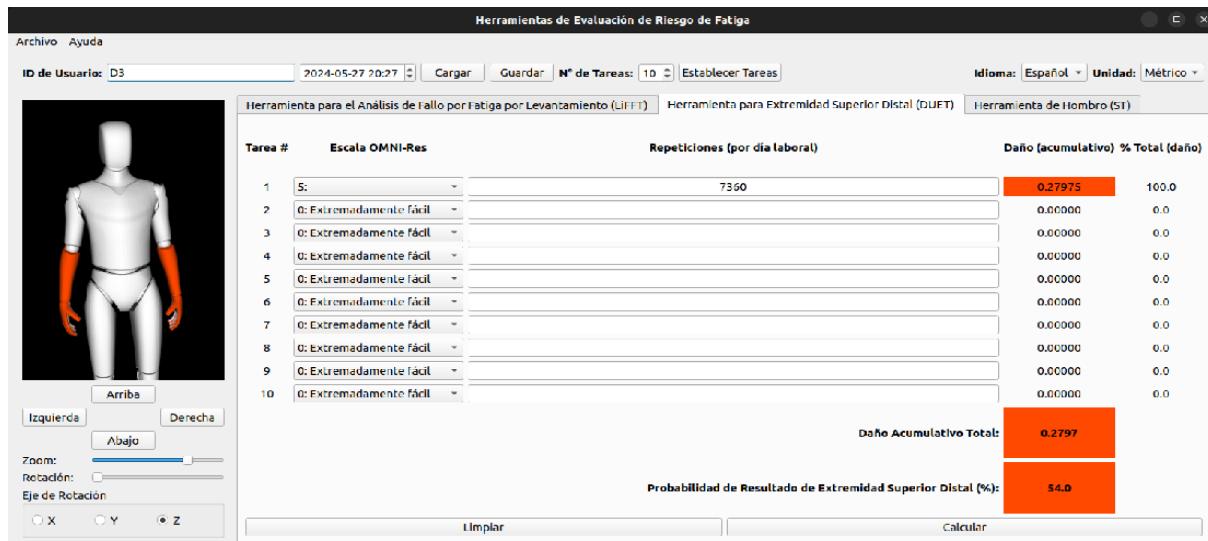
Elaboración propia

Figura 8. ErgoTools y DUET para D2.



Elaboración propia

Figura 9. ErgoTools y DUET para D2.



A partir de estos resultados, se sugiere evaluar la posibilidad de implementar estrategias de rotación en la línea de despinado, distribuyendo de forma más equitativa la carga repetitiva entre las trabajadoras. Asimismo, se recomienda revisar el diseño ergonómico de la herramienta de despinado, ya que su ajuste a la mano, resistencia del resorte y material del mango podrían estar contribuyendo a la aparición de molestias musculoesqueléticas. La incorporación de mejoras simples en la herramienta, junto con entrenamientos orientados a técnicas de agarre más eficientes, podría disminuir el riesgo de lesión y mejorar el confort durante el turno de trabajo.

Caso 3. Tránsito de cajas de salmón entre áreas de empaque y frigorífico.

Este caso aborda el trabajo realizado por operarios en las secciones de empaque (Figura 10) y frigorífico (Figura 11) de la planta procesadora. En la primera etapa, los filetes de salmón son colocados en cajas, pesados y sellados. Luego, las cajas selladas son levantadas y colocadas manualmente sobre pallets. Una vez lleno, el pallet se traslada al área de frigorífico. La Figura 10 ilustra a un trabajador (E1) ejecutando este ciclo: levantando cajas desde la unidad de sellado, transportándolas hacia el pallet, y depositándolas.

Las cajas manipuladas en este estudio tenían una masa de 25 kg, conforme a lo establecido en la normativa chilena conocida como “Ley del Saco”, que forma parte del Código del Trabajo y prohíbe que los trabajadores operen manualmente cargas superiores a este límite cuando no se dispone de ayudas mecánicas (Ley N° 20.949, modificatoria de la Ley N° 20.001).

En el Taller de Pausas Activas participaron 6 artesanos de TPC y 5 del grupo TP, véase Figura 5. El taller fue evaluado por los artesanos a través de un cuestionario de 10 preguntas, de los 11 participantes solo uno experimentó dificultades con un ejercicio debido a las instrucciones un poco confusas, sin embargo, la mayoría evaluó positivamente la información brindada, el tiempo asignado a cada actividad del taller y los ejercicios físicos realizados.

Figura 10. Trabajador en la sección de empaque (E1); (1) levantando una caja sellada; (2) en trayecto hacia el pallet; (3) colocando la caja sobre el pallet.



Elaboración propia

Figura 11. Trabajador en el área de frigorífico (F1); (1) levantando caja desde el pallet recibido de empaque; (2) transportando la caja hacia un nuevo pallet con tres cajas por nivel; (3) iniciando el levantamiento de la siguiente caja.



Elaboración propia

En el área de empaque, cada pallet se compone de siete niveles con cuatro cajas por nivel (total: 28 cajas). Estos pallets son trasladados al área de frigorífico, donde las condiciones térmicas son más exigentes y el espacio es más reducido. Allí, los trabajadores desarmán los pallets y reorganizan las cajas en nuevos pallets con tres cajas por nivel, de manera que puedan adaptarse mejor a la configuración del camión de despacho. La Figura 11 muestra parte de este proceso ejecutado por el trabajador F1.

Aunque ambos trabajadores movilizan la misma cantidad de cajas con idéntica masa promedio (25 kg), las diferencias en el riesgo asociado están determinadas por variables como el brazo de palanca (distancia horizontal desde la carga al eje lumbar), influido por características antropométricas y técnicas de levantamiento. Los resultados del análisis mediante la herramienta LIFT se resumen en la Tabla 3 y para TST en la Tabla 4.

Tabla 3. Resultados de análisis LIFT para E1 y F1.

	Trabajador 1 Empaque (E1)	Trabajador 2 Frigorífico (F1)
Carga levantada (N)	245.25	245.25
Esfuerzos diarios	189	189
Brazo Palanca (cm)	65	70
LIFT Score (% prob)	68.1	72.4
Lesión Lumbar	Si	Si

Elaboración propia

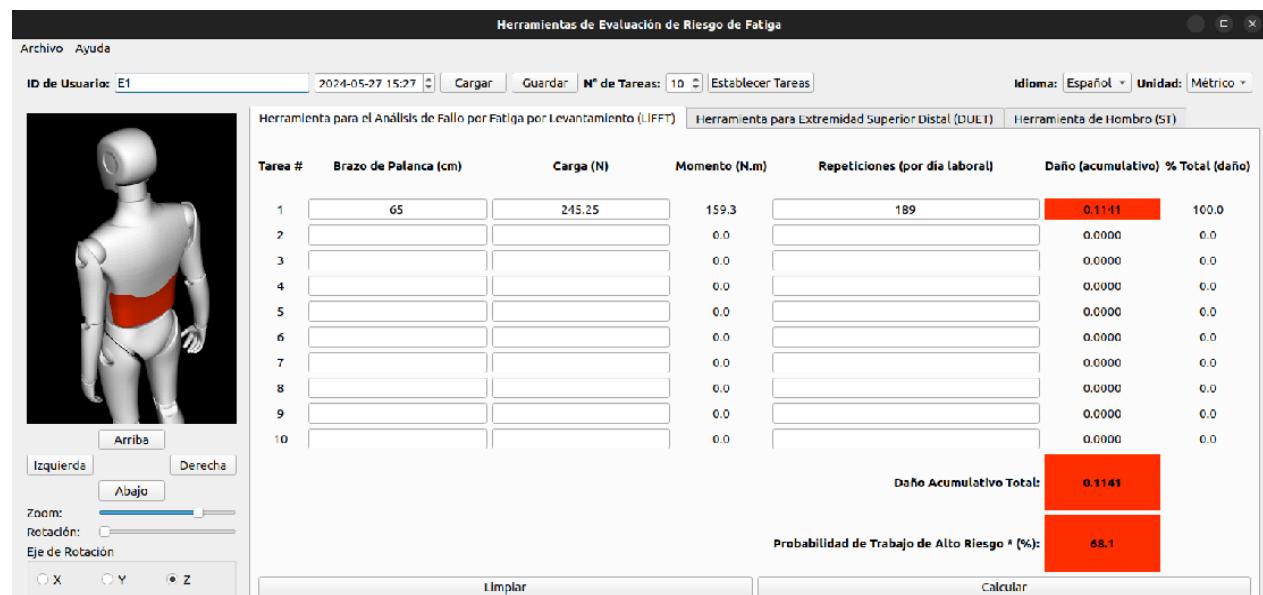
Tabla 4. Resultados de análisis TST para E1 y F1.

	Trabajador 1 Empaque (E1)	Trabajador 2 Frigorífico (F1)
Carga levantada (N)	122.62	122.62
Esfuerzos diarios	189	189
Brazo Palanca (cm)	38	35
TST Score (% prob)	68.1	72.4
Lesión en el Hombro	Si	Si

Elaboración propia

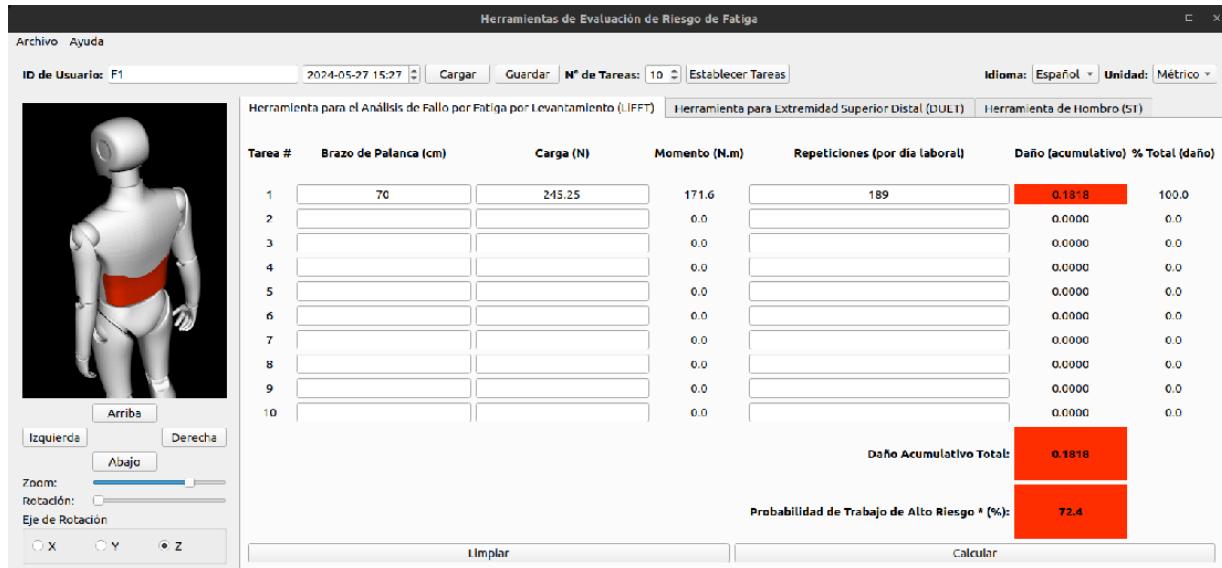
Ambos trabajadores presentan una probabilidad alta de lesión lumbar, reflejada tanto en el puntaje de LIFT y TST como en la sintomatología reportada. El hecho de que las cajas sean paletizadas manualmente en dos ocasiones consecutivas, dentro de un mismo flujo productivo, representa una oportunidad clara de mejora operativa. En la Figura 12 y 13 se ilustran los análisis usando LIFT para los casos E1 y F1 respectivamente, el avatar muestra en color rojo la zona afectada. Mientras que en las Figuras 14 y 15, se ilustran análisis para la misma tarea con un foco en los hombros, utilizando TST.

Figura 12. ErgoTools y LiFFT para E1.



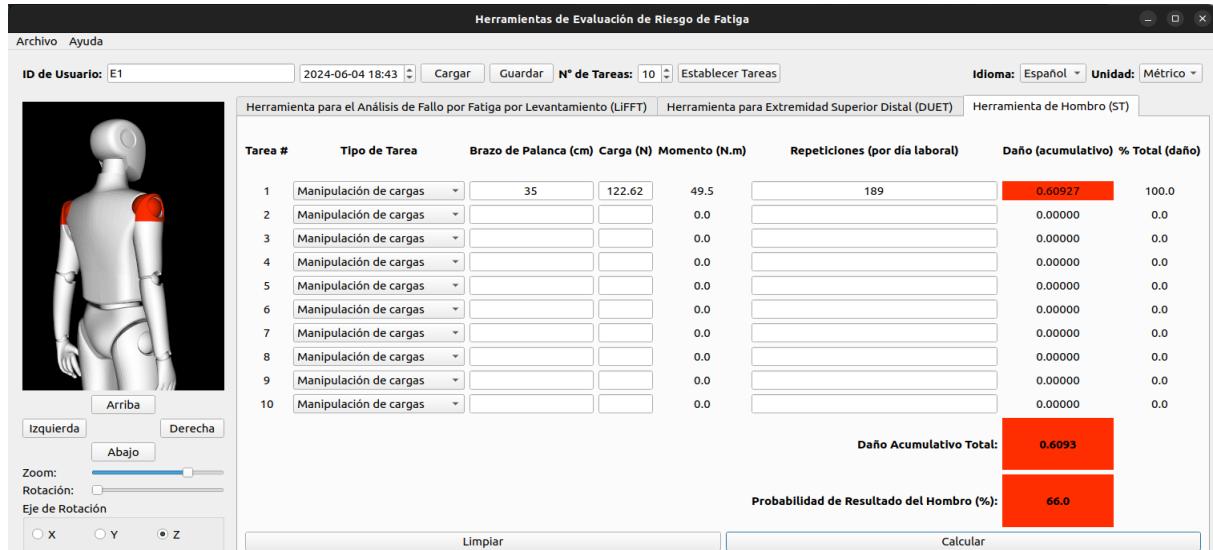
Elaboración propia

Figura 13. ErgoTools y LiFFT para F1



Elaboración propia

Figura 14. ErgoTools y TST para E1

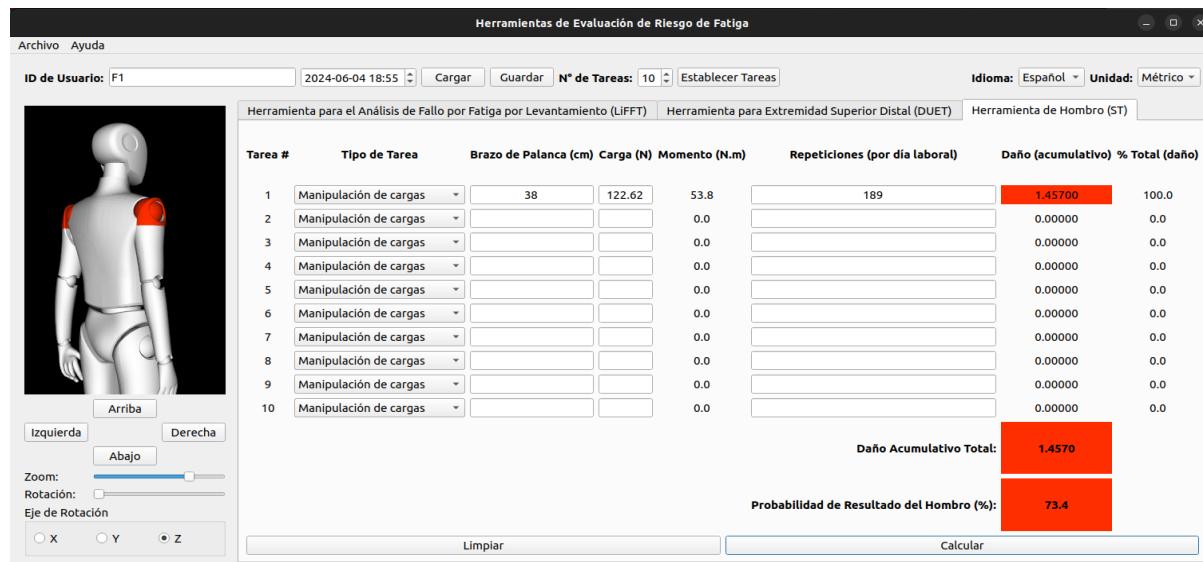


Elaboración propia

La aplicación de herramientas como LIFTY Y TST en tareas que combinan altos niveles de fuerza y repetición, como las observadas en este caso, permite identificar con claridad situaciones de riesgo que, en muchos casos, son evitables mediante ajustes en el diseño del trabajo o en la organización del flujo operativo. Contar con una herramienta validada que traduzca estas condiciones en una probabilidad cuantificable de lesión facilita priorizar acciones preventivas, respaldar decisiones ante la administración y justificar inversiones en mejoras que beneficien tanto la salud de los trabajadores como la continuidad operativa de la planta. Además, este tipo de diagnósticos objetivos ofrece un punto de partida sólido para la implementación de filosofías de excelencia en gestión, como lean manufacturing o teoría de restricciones, al evidenciar ineficiencias que afectan simultáneamente la productividad y el

bienestar de los trabajadores.

Figura 15. ErgoTools y TST para F1



Elaboración propia

Si bien los casos presentados permiten ejemplificar de forma clara el potencial de herramientas como LiFFT, DUET y TST para identificar riesgos ergonómicos y proponer mejoras operativas, el enfoque actual del software se encuentra limitado a evaluaciones discretas y retrospectivas. Las estimaciones realizadas se basan en variables como la postura más adversa o el nivel máximo de esfuerzo percibido, lo que implica una simplificación del ciclo de trabajo real, especialmente en tareas que presentan alta variabilidad intra-jornada (Nail-Ulloa et al., 2025).

Además, la herramienta no cuenta actualmente con integración en tiempo real con sistemas externos, como sensores portátiles (wearables) o plataformas de modelado digital del cuerpo humano, que permitirían una evaluación continua y automatizada de la carga ergonómica (Koopman et al., 2018; Marklin et al., 2024; Nail-Ulloa et al., 2021, 2025; Nail-Ulloa, Huangfu, et al., 2024; Nail-Ulloa, Zabala, et al., 2024). Esta limitación restringe su aplicación a contextos de análisis periódico, más que a entornos de monitoreo constante, lo que representa un desafío a considerar para futuras versiones de la herramienta.

Conclusiones

Los resultados presentados en este estudio destacan el potencial de integrar herramientas de evaluación ergonómica basadas en la teoría de falla por fatiga para mejorar la gestión del riesgo musculoesquelético en entornos industriales exigentes, como la industria salmonera chilena. El desarrollo de ErgoTools permitió centralizar en una sola plataforma las herramientas LiFFT, DUET y TST, facilitando su uso práctico y ampliando su aplicabilidad mediante visualizaciones integradas y análisis comparativos entre trabajadores, tareas y perfiles operativos.

Los tres casos analizados evidencian cómo estas herramientas pueden aportar no solo al análisis del riesgo físico, sino también a la identificación de oportunidades de mejora en productividad, calidad del producto y diseño de tareas. Al proporcionar una base cuantitativa y visual para el análisis ergonómico, la plataforma apoya decisiones informadas tanto en el ámbito técnico como en la gestión organizacional.

Finalmente, se propone que la implementación sistemática de este tipo de soluciones tecnológicas, junto con el uso estratégico de herramientas de mejora continua como lean manufacturing o teoría de restricciones, podría generar impactos positivos sostenibles en la salud de los trabajadores y en el desempeño operativo de la industria. ErgoTools representa un paso concreto hacia la democratización de herramientas científicamente validadas en contextos productivos reales, especialmente en regiones donde el acceso a este tipo de soluciones ha sido históricamente limitado.

Financiamiento y Agradecimientos

El presente estudio es parte del proyecto “Evaluando la Conexión entre Carga Acumulativa en Tejidos Musculoesqueléticos y su Efecto en la Productividad de Empresas del Rubro Salmonero”, financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad Austral de Chile (UACH), Sede Puerto Montt, código 52-Ines 23-IAPM-05. Los autores agradecen el trabajo en terreno de los estudiantes: Fernanda Rogel, Ángela Arriagada, Bastián Fuentes, Damián Paredes, Danitza Martínez, Elvis Vásquez, Isabella Bravo, Ignacia Aravena, Michelle Ríos, Sebastián Toro, Viviana Méndez, Lucas Barría y Nazareno Santis. Asimismo, se agradece a ACME Chile y sus trabajadores por su participación en el estudio.

Referencias

- Balogh, I., Arvidsson, I., Björk, J., Hansson, G. Å., Ohlsson, K., Skerfving, S., & Nordander, C. (2019). Work-related neck and upper limb disorders - Quantitative exposure-response relationships adjusted for personal characteristics and psychosocial conditions. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 20(1), 139. <https://doi.org/10.1186/s12891-019-2491-6>
- Bani Hani, D., Huangfu, R., Sesek, R., Schall, M. C., Davis, G. A., & Gallagher, S. (2021). Development and validation of a cumulative exposure shoulder risk assessment tool based on fatigue failure theory. *Ergonomics*, 64(1), 39–54. <https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1811399>
- Briggs, A. M., Woolf, A. D., Dreinhöfer, K., Homb, N., Hoy, D. G., Kopansky-Giles, D., Åkesson, K., & March, L. (2018). Reducing the global burden of musculoskeletal conditions. *Bulletin of the World Health Organization*, 96(5), 366. <https://doi.org/10.2471/BLT.17.204891>
- Bureau of Labor Statistics. (2020). Injuries, Illnesses, and Fatalities. <https://www.bls.gov/iif/home.htm>
- Callaghan, J. P., Salewytsch, A. J., & Andrews, D. M. (2001). An evaluation of predictive methods for estimating cumulative spinal loading. *Ergonomics*, 44(9), 825–837. <https://doi.org/10.1080/00140130118541>
- Gallagher, S., & Barbe, M. F. (2022). *Musculoskeletal Disorders: The Fatigue Failure Mechanism*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/978119640172>
- Gallagher, S., & Schall, M. C. (2017). Musculoskeletal disorders as a fatigue failure process: evidence, implications and research needs. *Ergonomics*, 60(2), 255–269. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1208848>
- Gallagher, S., Schall, M. C., Sesek, R. F., & Huangfu, R. (2018). An Upper Extremity Risk Assessment Tool Based on Material Fatigue Failure Theory: The Distal Upper Extremity Tool (DUET). *Human Factors*, 60(8), 1146–1162. <https://doi.org/10.1177/0018720818789319>
- Gallagher, S., Sesek, R. F., Schall, M. C., & Huangfu, R. (2017). Development and validation of an easy-to-use risk assessment tool for cumulative low back loading: The Lifting Fatigue Failure Tool (LiFFT). *Applied Ergonomics*, 63, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.04.016>
- Ilardi, J. S. (2012). Relationship between productivity, quality and musculoskeletal disorder risk among deboning workers in a Chilean salmon industry. *WORK*, 41(SUPPL.1), 5334–5338. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0052-5334>
- Jäger, M., Jordan, C., Luttmann, A., & Laurig, W. (2000). Evaluation and assessment of lumbar load during total shifts for occupational manual materials handling jobs within the Dortmund Lumbar Load Study - DOLLY. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 25(6), 553–571. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(99\)00043-8](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(99)00043-8)
- Koopman, A. S., Kingma, I., Faber, G. S., Bornmann, J., & van Dieën, J. H. (2018). Estimating the L5S1 flexion/extension moment in symmetrical lifting using a simplified ambulatory measurement system. *Journal of Biomechanics*, 70, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.10.001>
- Kumar, S. (1990). Cumulative Load as a Risk Factor for Back Pain. *Spine*, 15(12), 1311–1316. <https://doi.org/10.1097/000007632-199012000-00014>
- Leonidas, C., Eduardo, C., Giovanni, O., Victoria, V., Marcela, A., & Carolina, R. (2019). A Presentation of the Ergonomic Analysis of Risk Factors in Productive Sectors of Chile and Their Relation with Upper Limb Musculoskeletal Symptomatology. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 820, 570–578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96083-8_75
- Lorca Manquemilla, A., & Pinto Retamal, R. (2015). Identificación de riesgos biomecánicos de los/as trabajadores en plantas de proceso de salmón para la prevención de disfunción

- dolorosa de extremidad superior (DDES). *Ciencia & Trabajo*, 17(52), 22–27. <https://doi.org/10.4067/S0718-24492015000100005>
- Ley N.º 20.949. (2016, 17 de septiembre). Modifica el Código del Trabajo para reducir el peso de las cargas de manipulación manual (Diario Oficial de la República de Chile). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*.
- Marklin, R. W., Schabelski, J., Gallagher, S., Nail-Ulloa, I., & Shober, J. (2024). A Battery-Powered Tool to Move Utility Manhole Covers: Field Data and Proof of Concept. *Ergonomics in Design*, 10648046241260452. <https://doi.org/10.1177/10648046241260451>
- Nail-Ulloa, I., Gallagher, S., Huangfu, R., Bani-Hani, D., & Pool, N. (2021). Validation of a Wireless Sensor System for the Estimation of Cumulative Lumbar Loads in Occupational Settings. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 65(1), 489–494. <https://doi.org/10.1177/1071181321651078>
- Nail-Ulloa, I., Huangfu, R., Zabala, M., Bani Hani, D., Pool, N., Chen, H., Schall, M. C., Sesek, R., & Gallagher, S. (2024). Assessing the accuracy of a wireless sensor system for estimating lumbar moments during manual lifting tasks considering the effects of load weight, asymmetry, and height. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 103, 103636. <https://doi.org/10.1016/J.ERGON.2024.103636>
- Nail-Ulloa, I., Zabala, M., Pool, N., Sesek, R., Thiese, M., Sesek, R., Schall, M. C., Gallagher, S., & Schall Jr, M. C. (2025). A fatigue failure framework for the assessment of highly variable low back loading using inertial motion capture – a case study. *Ergonomics*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/00140139.2025.2460695>
- Nail-Ulloa, I., Zabala, M., Sesek, R., Chen, H., Schall, M. C., & Gallagher, S. (2024). Estimating Compressive and Shear Forces at L5-S1: Exploring the Effects of Load Weight, Asymmetry, and Height Using Optical and Inertial Motion Capture Systems. *Sensors*, 24(6), 1941. <https://doi.org/10.3390/s24061941>
- Ngajilo, D., & Jeebhay, M. F. (2019). Occupational injuries and diseases in aquaculture – A review of literature. *Aquaculture*, 507, 40–55. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2019.03.053>
- Norman, R., Wells, R., Neumann, P., Frank, J., Shannon, H., Kerr, M., Beaton, D. E., Bombardier, C., Ferrier, S., Hogg-Johnson, S., Mondloch, M., Peloso, P., Smith, J., Stansfeld, S. A., Tarasuk, V., Andrews, D. M., Dobbyn, M., Edmonstone, M. A., Ingelman, J. P., ... Woo, H. (1998). A comparison of peak vs cumulative physical work exposure risk factors for the reporting of low back pain in the automotive industry. *Clinical Biomechanics*, 13(8), 561–573. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(98\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(98)00020-5)
- Zelik, K. E., Nurse, C. A., Schall, M. C., Sesek, R. F., Marino, M. C., & Gallagher, S. (2022). An ergonomic assessment tool for evaluating the effect of back exoskeletons on injury risk. *Applied Ergonomics*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103619>



Todos los contenidos de la revista **Ergonomía, Investigación y Desarrollo** se publican bajo una [Licencia Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional](#) y pueden ser usados gratuitamente, dando los créditos a los autores y a la revista, como lo establece la licencia